

# Prognose wirtschaftlicher Produktlebenszyklen für das European Train Control System (ETCS)

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

**Dissertation**

von  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Albrecht Achilles  
geboren am 08. September 1978  
aus Berlin

Eingereicht am 06. Februar 2009

Disputation am 24. Juni 2009

Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Jörn Pacht  
Prof. Dr. Thomas Stefan Spengler

2009



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Rail Automation Graduate School (RA:GS) der Rail Automation Academy und wurde durch die Siemens AG, IMO, Berlin begleitet und gefördert.

Danken möchte ich auf diesem Wege Herrn Professor Dr.-Ing. Jörn Pachl, Leiter des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung (IfEV) an der Technischen Universität Braunschweig, zum einen für die Übernahme des Erstgutachtens, aber zum anderen vor allem für die wertvolle fachliche Betreuung und universitäre Begleitung der Dissertation.

Außerdem möchte ich Herrn Professor Dr. rer. pol. Thomas Spengler, dem Leiter des Instituts für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion (AIP) an der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie für die fruchtbare fachliche Auseinandersetzung mit der Arbeit danken.

Weiterhin gilt mein Dank der Siemens AG, die mir unter dem Dach des Graduiertenkollegs (RA:GS) die Möglichkeit für diese Promotion eröffnet hat.

Insbesondere möchte ich meinem betrieblichen Betreuer Herrn Olaf Mense für die unermüdliche Unterstützung in allen fachlichen und organisatorischen Belangen danken.

Für die Organisation des Graduiertenkollegs und begleitender Workshops gilt mein Dank ferner Herrn Professor Dr. rer. nat. Jens Braband, Siemens AG, IMO.

Nicht zuletzt danke ich vielen Mitarbeitern und Ansprechpartnern in und außerhalb der Siemens AG, die durch zahlreiche Diskussionen sowie durch zur Verfügung gestelltes Datenmaterial ihren Teil zur Arbeit beigetragen haben.

Albrecht Achilles

Berlin, den 31.01.2009





# Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund eines stark fragmentierten europäischen Eisenbahnsystems - hinsichtlich der zur Anwendung kommenden Zugbeeinflussungssysteme - hat es in den letzten zwei Jahrzehnten Anstrengungen gegeben ein neues, gesamteuropäisches Zugbeeinflussungssystem zu entwickeln und in das bestehende System Bahn zu migrieren.

Nachdem die technische Entwicklung des European Train Control Systems (ETCS) sehr weit fortgeschritten ist, tritt die Migration, also die Einführung des Systems und die Ablösung der bestehenden Systeme, immer weiter in den Fokus der Diskussion. Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit diesem Migrationsproblem aus dem Blickwinkel des Produktlebenszykluskonzeptes. Dazu wird die Migration als ein Teil des Zyklus verstanden, den technische Systeme entlang ihrer Entwicklung, Einführung, Nutzung und Ablösung durchlaufen.

Da die auswertbaren, empirischen Daten zur Entwicklung und zum Stand der Ausrüstung des Eisenbahnsystems mit Zugbeeinflussungssystemen nur marginal und für das neue System naturgemäß gar nicht eruierbar sind, wird die Problemstellung der Arbeit als Prognoseproblem aufgefasst.

Ziel der Arbeit ist es somit, begründete Prognosen zu Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen allgemein und zur Migration von ETCS im Besonderen zu generieren. Aus diesem Ziel abgeleitet, liegt das Hauptaugenmerk der Dissertation auf der Entwicklung und Umsetzung eines Prognosemodells, das die gesuchten Prognosen ermöglicht.

Ausgehend vom Konzept des Produktlebenszyklus, lehnt sich die theoretische Herleitung an die Adoptionstheorie an und nimmt somit einen mikroanalytischen Blickwinkel für die Modellbildung ein. Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass der makroanalytische Produktlebenszyklus durch die Menge an singulären Einzelentscheidungen zur Ausrüstung einer Einheit des Eisenbahnsystems, Fahrzeug oder Streckenkilometer, konstituiert wird.

Für die Modellierung wird diese Einzelentscheidung als ein Investitionsprozess aufgefasst und mittels Investitionsrechnung operationalisiert. Konkret kommt dabei die Kapitalwertmethode zum Einsatz.

Durch die Zweiteilung des Eisenbahnsystems in zwei komplementäre Segmente, Verkehrsmittel (i.e.S.) und Verkehrsweg, erwächst auch für die ebenfalls zweigeteilten Zugbeeinflussungssysteme ein Zwang zur Kompatibilität. Unter der Zugrundelegung der Netzeffekttheorie wird aus dieser Komplementarität die Verbreitung von kompatibler Systemtechnik im komplementären Gegenpart als ausschlaggebend für die Ausrüstungsentscheidung herausgearbeitet.

Damit wird außerdem ein Zugang zum Begriff der "Kritischen Masse", der in der Netzeffekttheorie, aber auch bei der Migration von neuen technischen Systemen eine

hohe Relevanz besitzt, für die Betrachtung von Zugbeeinflussungssystemen geschaffen.

Diese Betrachtung der Verbreitung von Systemtechnik wird in die Einzahlungen, die je Investitionsalternative in die Kapitalwertmethode einfließen, integriert. Um diese Kapitalwertmethode, die als das zentrale Entscheidungskriterium den Kern der Modellierung bildet, wird das theoretische Modell entwickelt.

Aufgrund der Komplexität dieses theoretischen Modells, die durch die Vielzahl der einzelnen Objekte, durch deren Interdependenz und durch die Interdependenz der mikro- und makroanalytischen Ebenen erwächst, wird als Analysemethode eine Simulationsuntersuchung und damit als zu realisierende Modellform ein Simulationsmodell angestrebt. Dieses Simulationsmodell wird in einem Datenbanksystem, als Komplex aus drei Datenbanken umgesetzt.

Abschließend kommt dieses Modell in drei Fallbeispielen zur Anwendung. In diesen Simulationsexperimenten wird zum einen die Validierung des Modells, als auch schließlich die Generierung von Aussagen hinsichtlich des Produktlebenszyklus von Zugbeeinflussungssystemen angestrebt. Im Einzelnen beziehen sich diese Fallbeispiele zum Ersten auf die Berliner S-Bahn, wo die Abbildung des konkreten Migrationsplanes im Vordergrund steht. Zum Zweiten wird ein Fallbeispiel erarbeitet, dass die Migration von ETCS in der Schweiz zum Gegenstand hat. Die Migration von ETCS im gesamteuropäischen Rahmen wird zum Dritten in einem abschließenden Fallbeispiel untersucht.



# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis . . . . .	VI
Abbildungsverzeichnis . . . . .	VIII
Tabellenverzeichnis . . . . .	X
1. Einleitung . . . . .	1
2. Konzeption eines theoretischen Fundaments . . . . .	3
2.1. Der Produktlebenszyklus als Grundkonzept . . . . .	3
2.1.1. Zieldefinition für die weiterführende Untersuchung . . . . .	6
2.1.2. Überblick zur theoretischen Basis des PLZ-Konzeptes . . . . .	7
2.1.3. Auswahl der grundlegenden theoretischen Herangehensweise . . . . .	9
2.2. Die Adoption als konstitutives Element der Mikroebene . . . . .	11
2.2.1. Anpassung der klassischen Adoptionstheorie . . . . .	11
2.2.2. Der Investitionsprozess als Abbildungskonzept . . . . .	18
2.2.3. Operationalisierung der Investitionsrechnung . . . . .	24
2.3. Simulation als Prognosemethodik . . . . .	32
2.3.1. Taxonomie der Prognosemethodiken . . . . .	32
2.3.2. Skizze eines Modellbegriffs . . . . .	34
2.3.3. Auswahl einer Untersuchungsmethodik . . . . .	36
2.4. Rekapitulation der grundlegenden Annahmen . . . . .	40
3. Konkretisierung des Modellbildes des Systems Eisenbahn . . . . .	41
3.1. Die Verkehrsdienstleistung aus der Potentialsicht . . . . .	41
3.2. Der Verkehrsdienstleister als Verkehrsbetrieb . . . . .	44
3.2.1. Die Verkehrsmittel & Verkehrswege als zentrale Betriebsmittel . . . . .	46
3.2.2. Die Betriebsmittel im Rahmen des gesamtbetrieblichen Handelns . . . . .	49
3.2.3. Die Organisation der Verkehrsbetriebe . . . . .	49
3.2.4. Die Zugangsbedingungen als Schnittstellendefinition . . . . .	52
3.3. Zugbeeinflussungssysteme im Verständnis der Arbeit . . . . .	54
3.3.1. Die Zugbeeinflussungssysteme als Zugangsvoraussetzungen . . . . .	54
3.3.2. European Train Control System - ETCS . . . . .	56
3.3.3. Integration der Zugbeeinflussungssysteme in das Modellbild . . . . .	63
3.4. Entwicklung des ausrüstungsabhängigen Kapitalwertes . . . . .	65
3.4.1. Auszahlungen . . . . .	66
3.4.2. Einzahlungen . . . . .	74
3.5. Integration des Gesamtmodells . . . . .	89
3.5.1. Abbildung des Zeitverlaufs . . . . .	90
3.5.2. Strategische Interaktionen . . . . .	90

4. Fallbeispiele . . . . .	94
4.1. Fallbeispiel - „ZBS“-Migration bei der Berliner S-Bahn . . . . .	95
4.1.1. Zielstellungen des Simulationsexperimentes . . . . .	95
4.1.2. Die Datenaufbereitung für das Ausgangsszenario . . . . .	96
4.1.3. Das reale Migrationsszenario . . . . .	97
4.1.4. Ein fiktives Szenario . . . . .	98
4.1.5. Allgemeine Bewertung . . . . .	99
4.2. Fallbeispiel - ETCS-Migration in der Schweiz . . . . .	100
4.2.1. Zielstellungen des Simulationsexperimentes . . . . .	100
4.2.2. Die Datenaufbereitung für das Ausgangsszenario . . . . .	101
4.2.3. Das reale Migrationsszenario . . . . .	103
4.2.4. Ein fiktives Szenario . . . . .	105
4.2.5. Allgemeine Bewertung . . . . .	108
4.3. Fallbeispiel - ETCS-Migration in Europa . . . . .	108
4.3.1. Zielstellungen des Simulationsexperimentes . . . . .	109
4.3.2. Die Datenaufbereitung für das Ausgangsszenario . . . . .	109
4.3.3. Das reale Migrationsszenario . . . . .	110
4.3.4. Ein fiktives Szenario . . . . .	113
4.3.5. Allgemeine Bewertung . . . . .	115
5. Resümee und Ausblick . . . . .	117
Literaturverzeichnis . . . . .	120
Anhang . . . . .	132

# Abkürzungsverzeichnis

<b>a</b>	Jahr
<b>AEG</b>	Allgemeines Eisenbahngesetz
<b>CBT</b>	Ceneri Basistunnel
<b>CER</b>	Communauté européenne du rail - Gemeinschaft der Europäischen Bahnen
<b>DB AG</b>	Deutsche Bahn AG
<b>DBGrG</b>	Deutsche Bahn Gründungsgesetz
<b>DBS</b>	Datenbanksystem
<b>EBO</b>	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
<b>EGV</b>	Vertrag zur Gründung der europäischen Gemeinschaft
<b>EIB</b>	Eisenbahninfrastrukturbetreiber
<b>EIBV</b>	Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung
<b>EIM</b>	European Rail Infrastructure Managers
<b>ENT</b>	Entscheidung, Rechtsakt nach Art. 249 EGV [155]
<b>ERTMS</b>	European Rail Train Management System
<b>ETCS</b>	European Train Control System
<b>ETCS L1</b>	ETCS Level 1 - Full Supervision
<b>ETCS L2</b>	ETCS Level 2
<b>ETCS LS</b>	ETCS Level 1 - Limited Supervision
<b>ETM</b>	Eurobalise Transmission Modul
<b>ETML</b>	European Train Management Layer
<b>EuroSys</b>	Zugbeeinflussungssystem Klasse B - bestehend aus Interoperabilitätskomponenten
<b>EuGH</b>	Gerichtshof der Europäischen Gemeinschaften
<b>EVU</b>	Eisenbahnverkehrsunternehmen
<b>GBT</b>	Gotthard Basistunnel
<b>GP</b>	Gleichgewichtspunkt
<b>GSM-R</b>	Global System for Mobile Communications - Railway
<b>GüV</b>	Güterverkehr
<b>HGV</b>	Hochgeschwindigkeitsverkehr
<b>i.A.</b>	im Auftrag
<b>i.e.S.</b>	im engeren Sinne
<b>Kat.</b>	Kategorie

<b>LBT</b>	Lötchberg Basistunnel
<b>LCC</b>	Life Cycle Cost - Lebenszykluskosten
<b>LEU</b>	Lineside Electronic Units
<b>LZB</b>	„Linienzugbeeinflussung“ (Zugbeeinflussungssystem) - Deutschland, Österreich, Spanien
<b>NBS</b>	Neubaustrecke
<b>PLZ</b>	Produktlebenszyklus
<b>PV</b>	Personenverkehr
<b>PZB</b>	„Punktförmige Zugbeeinflussung“ (Zugbeeinflussungssystem) - Deutschland, Österreich, Rumänien, Kanada
<b>RAMS</b>	Reliability, Availability, Maintainability, Safety - Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit
<b>RL</b>	Richtlinie, Rechtsakt nach Art. 249 EGV [155]
<b>ROCE</b>	Return on Capital Employed
<b>SBB</b>	Schweizerischen Bundesbahnen SBB
<b>SGV</b>	Schienengüterverkehr
<b>SNB</b>	Schienennetz-Benutzungsbedingungen
<b>SPFV</b>	Schienenpersonenfernverkehr
<b>SPNV</b>	Schienenpersonennahverkehr
<b>SRS</b>	System Requirement Specification
<b>STM</b>	Specific Transmission Module
<b>SysBL1</b>	Punktförmiges Zugbeeinflussungssystem Klasse B
<b>SysBL2</b>	Kontinuierliches Zugbeeinflussungssystem Klasse B
<b>TEIV</b>	Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung
<b>TSI</b>	Technische Spezifikation für Interoperabilität
<b>UIC</b>	Union internationale des chemins de fer - Internationaler Eisenbahnverband
<b>UNIFE</b>	Union des Industries Ferroviaires Europeennes - Verband der europäischen Eisenbahn-Industrie
<b>UNISIG</b>	Union Industry of Signaling - Union der Signalbauindustrie
<b>VO</b>	Verordnung, Rechtsakt nach Art. 249 EGV [155]
<b>ZBS</b>	Zugbeeinflussungssystem - zus. in Kapitel 4.1: „Zugbeeinflussungssystem der Berliner S-Bahn“
<b>ZUB</b>	„Zugbeeinflussung“ (Zugbeeinflussungssystem) - Schweiz, Deutschland, Dänemark

# Abbildungsverzeichnis

1.1.	Schematische Übersicht des weiteren Vorgehens . . . . .	2
2.1.	Klassischer Produktlebenszyklus . . . . .	3
2.2.	Erweiterter Produktlebenszyklus (Quelle: vgl. [130, S. 9], [161, S. 34]) . . . .	4
2.3.	Grundstruktur einer Prognose . . . . .	6
2.4.	Verschiedene Verläufe des Bass-Modells (Quelle: vgl. [4, S. 419]) . . . . .	9
2.5.	Prinzipielles Vorgehen entlang der allgemeinen Prognosestruktur . . . . .	10
2.6.	Netzeffektinduzierte Rückkopplung (Quelle: vgl. [84, S. 97]) . . . . .	13
2.7.	Mikro- und Makroebene (Quelle: vgl. [134, S. 51]) . . . . .	14
2.8.	Ebenenmodell für indirekte Netzeffekte der ZBS . . . . .	16
2.9.	Kreislauf des Investitionsprozesses . . . . .	18
2.10.	Differenzierter Kreislauf des Investitionsprozesses . . . . .	19
2.11.	Die Entscheidungsfindung als Prozesskette . . . . .	21
2.12.	Idealisierte Zinsstrukturkurven . . . . .	24
2.13.	Taxonomie der Investitionsrechnungsverfahren (Quelle: vgl. [126, S. 17f.]) . .	25
2.14.	Diskontierung fiktiver Zahlungsströme einer Investition . . . . .	29
2.15.	Taxonomie der Prognosemethodiken (Quelle: vgl. [139, S. 155]) . . . . .	33
2.16.	Ebenen der Modellvalidierung (Quelle: vgl. [151, S. 8]) . . . . .	35
2.17.	Modellierung und Modellanalyse (Quelle: vgl. [9, S. 51]) . . . . .	36
2.18.	Prinzipieller Aufbau des Computermodells . . . . .	39
2.19.	Rekapitulation der theoretischen Fundierung . . . . .	40
3.1.	Übersicht des Vorgehens entlang der Modellbildung . . . . .	41
3.2.	Dimensionen der Verkehrsdienstleistung . . . . .	43
3.3.	Nutzen- und Kostenverläufe der Verkehrsdienstleistung . . . . .	44
3.4.	Zielkonflikte entlang der DB AG als Verkehrsbetrieb (Quelle: vgl. [25, S. 42])	45
3.5.	Taxonomie der Fahrzeuge (Quelle: vgl. [119, S. 12]) . . . . .	47
3.6.	Verkehrsdienstleistung als „Potentialdreieck“ . . . . .	48
3.7.	Die Wertschöpfungskette der Verkehrsdienstleistung aus Potentialsicht . .	51
3.8.	Vielfalt der Zugbeeinflussungssysteme in Europa (Quelle: vgl. [156, S. 72]) . .	57
3.9.	Prinzipiskizze ETCS Level 1 & 2 (Quelle: vgl. [118, S. 730]) . . . . .	58
3.10.	Grundlegende Rechtsdokumente für ETCS . . . . .	61
3.11.	Zusammenführung nationaler Migrationspläne (Quelle: vgl. [47, S. 79]) . . . .	62
3.12.	Systemebene des Potentialdreiecks . . . . .	63
3.13.	Metaebene des Potentialdreiecks . . . . .	64
3.14.	Fiktive, dynamische Preisfunktion eines Systems . . . . .	69
3.15.	Verlauf des Abnutzungsvorrates (Quelle: vgl. [113, S. 6]) . . . . .	72



3.16. Idealisierter Verlauf von Ausfallraten (Quelle: vgl. [76, S. 76]) . . . . .	73
3.17. Fiktives Ertragsgebirge mit zwei Produktionsfaktoren . . . . .	76
3.18. Gleichgewichtspunkt im Ertragsgebirge . . . . .	77
3.19. Differenziertes Potentialdreieck . . . . .	80
3.20. Multiple Gleichgewichtspunkte im Ertragsgebirge . . . . .	81
3.21. Modulkomposition . . . . .	89
3.22. Überblick der strategischen Interaktionen . . . . .	92
4.1. S-Bahnsystem als Potentialdreieck . . . . .	96
4.2. Schweizer Eisenbahnsystem als differenziertes Potentialdreieck . . . . .	101
4.3. Europäisches Eisenbahnsystem als differenziertes Potentialdreieck . . . . .	109

# Tabellenverzeichnis

2.1. Netzeffekt- und Systemgüter [vgl. 158, S. 44] . . . . .	15
2.2. Gegenüberstellung von Adoptionstheorie und ZBS-Übernahmeprozess . . .	17
3.1. Kategorisierung des Fuhrparks und der Betriebsleistung . . . . .	79
3.2. Streckenstandards der Richtlinie 413 der DB Netz AG [vgl. 31] . . . . .	79
b.1. Systemkompatibilität - Fallbeispiel S-Bahn . . . . .	135
b.2. Systempakete der Fahrzeugseite - Fallbeispiel S-Bahn . . . . .	135
b.3. Systempakete der Netzseite - Fallbeispiel S-Bahn . . . . .	135
b.4. Eingangsdaten - Fallbeispiel S-Bahn . . . . .	136
c.1. Systemkompatibilität - Fallbeispiel Schweiz . . . . .	145
c.2. Systempakete der Fahrzeugseite - Fallbeispiel Schweiz . . . . .	145
c.3. Systempakete der Netzseite - Fallbeispiel Schweiz . . . . .	145
c.4. Eingangsdaten - Fallbeispiel Schweiz . . . . .	146
d.1. Systemkompatibilität - Fallbeispiel Europa . . . . .	170
d.2. Systempakete der Fahrzeugseite - Fallbeispiel Europa . . . . .	170
d.3. Systempakete der Netzseite - Fallbeispiel Europa . . . . .	170
d.4. Eingangsdaten - Fallbeispiel Europa . . . . .	171
d.5. ETCS Projekte - Fallbeispiel Europa . . . . .	172



„Kein Volk gibt es [...], mag es noch so fein und gebildet, noch so roh und unwissend sein, das nicht der Ansicht ist, die Zukunft könne gedeutet und von gewissen Leuten erkannt und vorhergesagt werden.“<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Marcus Tullius Cicero, 44 v. Chr. [28, S. 15]

# 1. Einleitung

Seit Jahrzehnten ist der Anteil des Verkehrsträgers Eisenbahn an der Verkehrsleistung in Deutschland und Europa rückläufig. [23]

Im Zuge des Zusammenwachsens des europäischen Wirtschaftsraums, das zu einer starken Zunahme der internationalen Verflechtungen der Wirtschaft und der Gesellschaft und damit zu einem Anstieg der Verkehrsströme sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr geführt hat, ist die Inkompatibilität der nationalen Eisenbahnsysteme immer stärker in den Fokus der Diskussion geraten.

Da diese Inkompatibilität die Bildung von internationalen Transportketten unter Einbeziehung des Verkehrsträgers Eisenbahn beeinträchtigt, ist hierin eine Ursache des Rückgangs des Anteils am Modal Split zu sehen.

Ein Aspekt der Inkompatibilität wird durch die nationalen Zugbeeinflussungssysteme geformt. Diese technischen Zugsicherungssysteme, die als Teil der Sicherheitskette des Eisenbahnverkehrs in ihrer grundsätzlichen Funktion die Lücke zwischen betrieblichen Regelwerken und tatsächlichem menschlichen Verhalten schließen sollen, haben sich in Europa in den einzelnen Ländern nach verschiedenen technischen Ansätzen und Philosophien entwickelt.

Letztlich hat diese Entwicklung zu einer Vielfalt von über 20 zumeist inkompatiblen Systemen geführt, die Barrieren für den internationalen Eisenbahnverkehr auch in einem geeinten Europa darstellen.

Im Zuge der Liberalisierung und Wiederbelebung des Eisenbahnsektors auf europäischer Ebene stellt die Entwicklung und Implementierung eines neuen europaweit einheitlichen Zugbeeinflussungssystems - European Train Control System (ETCS) - einen Aspekt der verfolgten Strategie dar. [51, S. 7]

Mit der Migration des neuen Systems in das bestehende Eisenbahnsystem stellt sich auch die Frage der Ablösung der alten Systeme. Dieser Prozess der Migration bzw. Implementierung und Nutzung des neuen Systems sowie die Ablösung alter Systeme bildet den Hauptfokus der vorliegenden Arbeit.

Durch diesen Fokus werden die Zugbeeinflussungssysteme und ihre Verbreitung im System Eisenbahn zu den zentralen Untersuchungsgegenständen. Bei der Diskussion werden diese Systeme als „Black Box“ betrachtet, so dass vom Prozess der Entwicklung sowie von der konkreten technischen Realisierung der einzelnen Systeme abstrahiert wird und eine Unterscheidung lediglich entlang verschiedener Leistungsparameter stattfindet.

Den Rahmen für die im Weiteren angestrebte Behandlung der Implementierung von ETCS im Speziellen und Zugbeeinflussungssystemen im Allgemeinen bildet das betriebswirtschaftliche Konzept des Produktlebenszyklus. Hiermit wird der Auffassung gefolgt,

dass sowohl die Implementierung als auch die Nutzung und abschließende Ablösung eines Systems Teile eines Nutzungszyklus sind, die, für alle gleichartigen Systeme über die Zeit aggregiert, einen charakteristischen Produktlebenszyklus bilden.

Im Kapitel 2 wird dieser theoretische, konzeptionelle Rahmen des Produktlebenszyklus für die weitere Untersuchung konkretisiert. Dabei strebt die Konkretisierung von der Definition der Zielstellung als Prognoseproblem über die mikroanalytische Adoptions- und Investitionstheorie, entlang der Theorie der Netzeffekte, auf eine Simulationsuntersuchung als grundsätzliche Methodik zu.

Im Kapitel 3 wird parallel dazu das Modellbild eines Eisenbahnsystems erarbeitet, das die zentralen Akteure und Einflussparameter auf den Produktlebenszyklus von Zugbeeinflussungssystemen erfasst. Diesbezüglich werden, ausgehend vom Begriff der Verkehrsdienstleistung, eine potentialorientierte Sichtweise und schließlich ein Potentialdreieck entwickelt, in das die theoretischen Überlegungen aus dem Kapitel 2 einfließen.

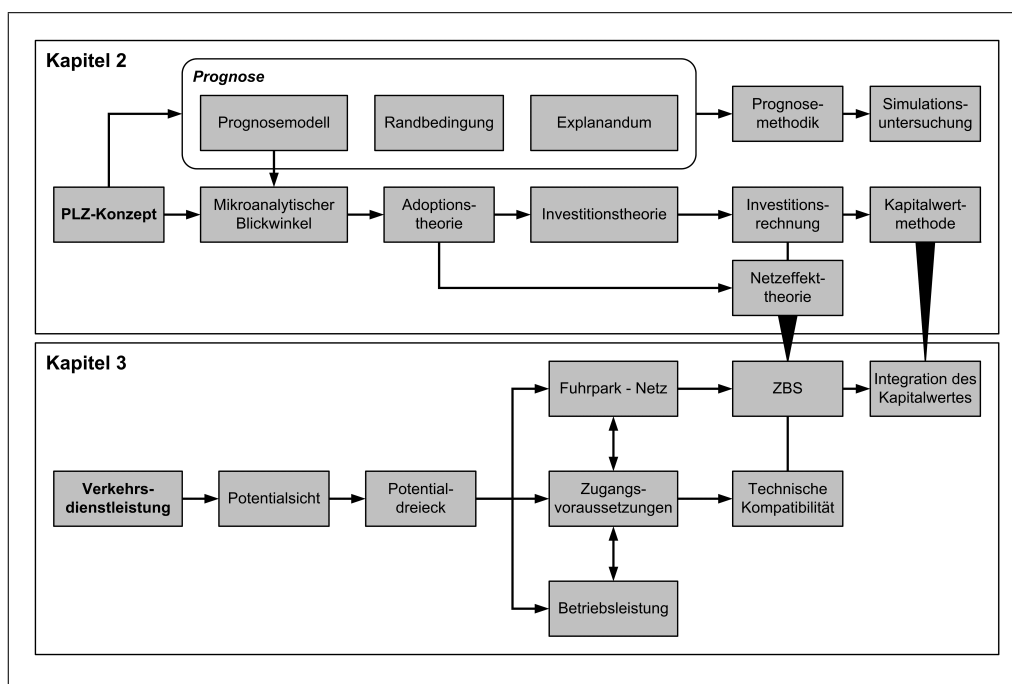


Abbildung 1.1.: Schematische Übersicht des weiteren Vorgehens

Abbildung 1.1 stellt diesen zweigleisigen Prozess dar und kann als Ablaufplan für das weitere Vorgehen in der Arbeit verstanden werden.

Abschließend werden diese Punkte zu einem Simulationsmodell verdichtet, das im Kapitel 4 zur Anwendung kommt. Hier wird das Simulationsmodell, das im Zuge der Arbeit als lauffähiges Computermodell realisiert wurde, in drei Fallbeispielen eingesetzt. Diese Simulationsexperimente dienen sowohl der „angewandten Validierung“ des Modells als auch zur konkreten, fallbezogenen „Prognose wirtschaftlicher Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen“.

## 2. Konzeption eines theoretischen Fundaments

Wie in der Einleitung angedeutet, vollzieht sich im folgenden Kapitel die Konkretisierung der Aufgabenstellung sowie die theoretische Fundierung der weiteren Arbeit. Zweck dieses Kapitels ist es somit, die Zielstellung der Arbeit herauszuarbeiten, die theoretischen Grundlagen zu entwickeln sowie die verwendete Methodik zu umreißen.

### 2.1. Der Produktlebenszyklus als Grundkonzept

Den konzeptionellen Rahmen und den Einstieg in das Thema der Arbeit bildet das betriebswirtschaftliche Konzept des Produktlebenszyklus (PLZ). Olbrich fasst dessen Grundgedanken darin zusammen, dass ein Produkt, in Analogie zu einem Lebewesen, verschiedene Phasen in seinem Dasein, von der Entstehung bis zum Ende, durchläuft [115, S. 69]. Dabei wird die Entwicklung des Produktes anhand des zeitlichen Verlaufs des Absatzes, des durch den Absatz erreichten Umsatzes, Gewinns oder der Zahlungsströme sowie sonstiger ableitbarer Größen dargestellt. [67, S. 6]

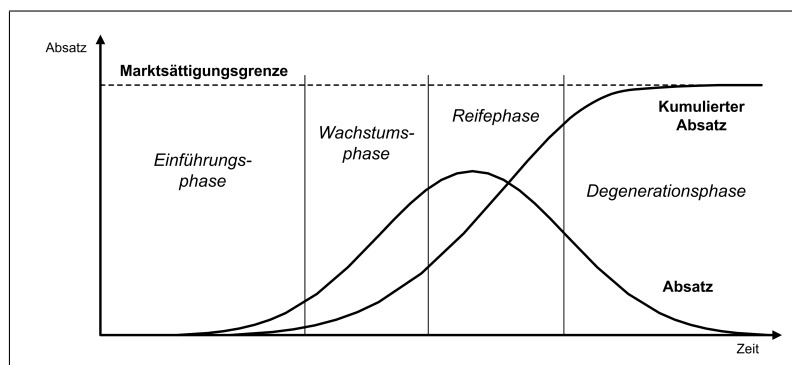


Abbildung 2.1.: Klassischer Produktlebenszyklus

In der Theorie, die idealtypisch von einem glockenförmigen Verlauf des Absatzes eines Produktes ausgeht, wie Abbildung 2.1 exemplarisch zeigt, lassen sich die Phasen einer Produktentwicklung klar benennen und voneinander abgrenzen. Dabei kann die Phaseneinteilung je nach Untersuchungsschwerpunkt verschieden sein. Wird der Absatz über den Zeitverlauf aggregiert, ergibt sich das typische Bild eines Wachstumsprozesses, der auf eine maximale Grenze zustrebt. Diese Grenze markiert als Marktsättigungsgrenze die Aufnahmefähigkeit des betrachteten Marktes für das betreffende Produkt.

Die Entwicklungen auf dem Gebiet des Produktlebenszyklus, die in der Mitte des 20. Jahrhunderts begannen, haben die Grenzen des klassischen Konzepts um vor- und nachgelagerte Phasen erweitert. Einen kurzen Überblick über die Entwicklungen auf dem Gebiet der Forschung zu Produktlebenszyklen bietet zum Beispiel Fischer [67, S. 27ff.]. Die Abbildung 2.2 zeigt ein erweitertes Phasenmodell, das, angelehnt an Riezler [130, S. 9] und Zehbold [161, S. 34], vorgelagerte Aktivitäten, Zahlungsströme sowie Verläufe des Absatzes und des Ersatzes eines Produktes über den gesamten Zeitverlauf darstellt. Letztendlich ist jedoch zu beachten, dass auch die Verläufe der erweiterten Produktlebenszyklen zumeist idealtypischer Natur sind und das Gesamtkonzept gemeinhin nur „normativen Charakter“ besitzt. [85, S. 48]

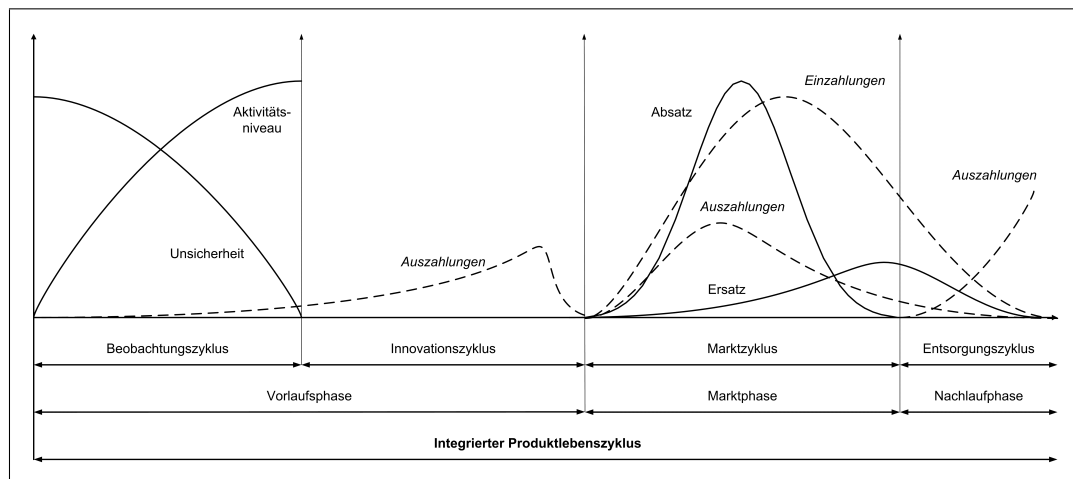


Abbildung 2.2.: Erweiterter Produktlebenszyklus (Quelle: vgl. [130, S. 9], [161, S. 34])

Vor der Anwendung des Konzeptes ist zu diskutieren, auf welcher Aggregationsstufe die Betrachtung des Produktes erfolgt. Fischer folgend sind die Stufen „Produktklasse“, „Produktform“ und „Produkt“ zu unterscheiden [67, S. 4f.]. Dabei kann die Abgrenzung der drei Stufen direkt am Beobachtungsgegenstand „Zugbeeinflussungssystem“ vollzogen werden.

Eine Produktklasse umfasst alle Produktformen und Produkte, die als Substitute auf die Befriedigung von bestimmten Bedürfnissen ausgerichtet sind [67, S. 82]. Die Zugbeeinflussungssysteme als Gesamtheit können, wenn das grundlegende Bedürfnis in der Konstitution einer technischen Unterstützung der Sicherheitskette im Eisenbahnbetrieb zwischen Fahrzeug und Fahrweg gesehen wird, als Produktklasse aufgefasst werden. Die Produktformen innerhalb dieser Klasse vereinen Systeme, die prinzipiell gleichartige Realisierungen hinsichtlich der zugrunde liegenden Technik, Konstruktion und Gestaltung darstellen. Auf dieser Ebene kann die Produktklasse der Zugbeeinflussungssysteme, exemplarisch für Deutschland, in die Produktformen „Linienzugbeeinflussung“ („LZB“), „Punktförmige Zugbeeinflussung“ („PZB“) oder „ETCS“ unterteilt werden.

Die dritte Stufe der Produkte unterscheidet schließlich die Entwicklungsstufen einer einzelnen Produktform sowie Ausprägungen und spezifische Realisierungen, die durch

bestimmte Unternehmen am Markt etabliert werden. Um bei dem Beispiel der deutschen Zugbeeinflussungssysteme zu bleiben, stellt die Menge der Systeme der Entwicklungsstufen „Indusi I54“, „Indusi I60“, „Indusi I60R“ und „PZB90“ eines Herstellers jeweils ein Produkt der Produktform „PZB“ dar.

In der Auswahl einer Aggregationsstufe spielt die Abbildungstiefe der Zugbeeinflussungssysteme als Untersuchungsobjekte eine zentrale Rolle. Da die reale technische Konstruktion und Realisierung dieser Systeme aus der „Black Box“-Sicht nicht betrachtet wird, stellt sich die Produktform innerhalb des PLZ-Konzeptes als die für die weitere Untersuchung günstigste und weiterhin verfolgte Aggregationsstufe dar.

Neben der Definition des „Produktes“ steht die Abgrenzung des „Absatzes“ vor einer weiteren Benutzung des Konzeptes. Innerhalb der Aggregationsstufe der Produktform kann eine einzelne Produkteinheit als primäre Beobachtungsstufe angesehen werden. Für die Zugbeeinflussungssysteme bedeutet dies, dass das einzelne System in der Anwendung mit einer einzelnen Einheit des Bahnsystems als Absatz definiert wird. Konkret verdeutlicht werden kann dies an einem einzelnen Fahrzeug oder einem einzelnen Kilometer, deren Ausrüstung mit einem System einen „einzelnen Absatz“ im Sinne der Arbeit darstellt.

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass mit der Erweiterung des „Absatzes“ auf den Ausdruck „Ausrüstung“ auch die Dimension der Nutzung und der anschließenden Deinstallation relevant wird. Somit ist mit dem Absatz nicht nur der Eintritt eines Systems in den Markt beobachtbar, sondern auch dessen Nutzungsphase und Austritt. Dies schlägt sich an späterer Stelle in der weiteren Analyse nieder. Vorwegzunehmen ist jedoch, dass damit für die weitere Diskussion nicht nur die reine Markt- oder Absatzphase, sondern auch eine nachgelagerte Entsorgungsphase bis zum vollständigen Ausscheiden eines Systems aus dem Gesamtsystem Bahn im Mittelpunkt steht.

Dagegen bleiben vorgelagerte Phasen, wie zum Beispiel Inventions- oder Innovationsphasen, unbeachtet. Dies bedeutet, dass innerhalb des Produktlebenszyklus alle Zugbeeinflussungssysteme als vollständig abgeschlossen entwickelte Systeme angesehen werden, die dem Markt in einer nicht modifizierbaren Version uneingeschränkt zur Verfügung stehen. Gerade vor dem Hintergrund der langjährigen und andauernden Entwicklung von ETCS und der damit verbundenen Spezifikationen (siehe Kapitel 3.3.2) ist dies explizit als Annahme zu kennzeichnen.

Für den Einstieg in die weitere Diskussion können aus der Benutzung des Produktlebenszykluskonzeptes als Ausgangsbasis folgende Punkte zusammengefasst werden.

- Die Zugbeeinflussungssysteme werden auf der Aggregationsstufe der Produktform betrachtet.
- Der einzelne Absatz besteht in der Ausrüstung eines Einzelelementes des Bahnsystems mit einem konkreten System innerhalb der jeweiligen Produktform.
- Im Sinne einer Ausrüstung sind für das einzelne System neben der Installation auch die Nutzung und die Deinstallation relevant.
- Betrachtet über den Zeitverlauf, formt der Absatz den eigentlichen „Lebenszyklus“ einer Produktform.



- Dieser „Lebenszyklus“ wird prinzipiell als zeitlich begrenzt angenommen und nur in der Markt- und der Entsorgungsphase betrachtet.

### 2.1.1. Zieldefinition für die weiterführende Untersuchung

Mit diesen Annahmen lässt sich die Aufgabe der Arbeit auf die Untersuchung der zeitlichen Verläufe des Absatzes von Zugbeeinflussungssystemen sowie hiermit verbundener Größen konkretisieren. Dabei kann diese Erörterung grundsätzlich zwei Zielrichtungen verfolgen. Einerseits können Erklärungen angestrebt werden, bei denen vergangene Entwicklungen von Lebenszyklen näher beleuchtet werden. Andererseits können Prognosen über zukünftige, zu erwartende Verläufe im Mittelpunkt stehen.

Da die Untersuchung explizit auf die Behandlung von ETCS als das neue, gesamteuropäische Zugbeeinflussungssystem abzielt, kann die zukünftige Verbreitung als zentraler Analyseschwerpunkt beschrieben werden. Dazu tritt, dass auch für die „älteren“ Systeme keine oder nur in sehr begrenztem Umfang empirische Daten in Form von auswertbaren Zeitreihen vorliegen. Dies zusammenführend, wird die gesamte Arbeit als quantitatives Prognoseproblem aufgefasst und stellt damit die Prognose als Untersuchungsziel ins Zentrum des weiteren Vorgehens.

Kornmeier ordnet Prognosen den empirischen, zusammengesetzten Aussagen zu. Dabei bedeutet der empirische Bezug, dass sie mit einem realen Sachverhalt im Zusammenhang stehen und prinzipiell wahrheitsfähig sind [90, S. 46]. Die Prognose an sich unterteilt er in einer dreigeteilten Struktur in nomologische Aussagen, Randbedingungen und schließlich das Explanandum, die eigentliche Prognoseaussage. Die nomologischen Aussagen ebenso wie die Randbedingungen sind dabei als gegeben zu betrachten und werden miteinander verknüpft, um letztlich zum Explanandum zu gelangen [90, S. 56]. Abbildung 2.3 versucht hiervon einen Eindruck zu vermitteln.

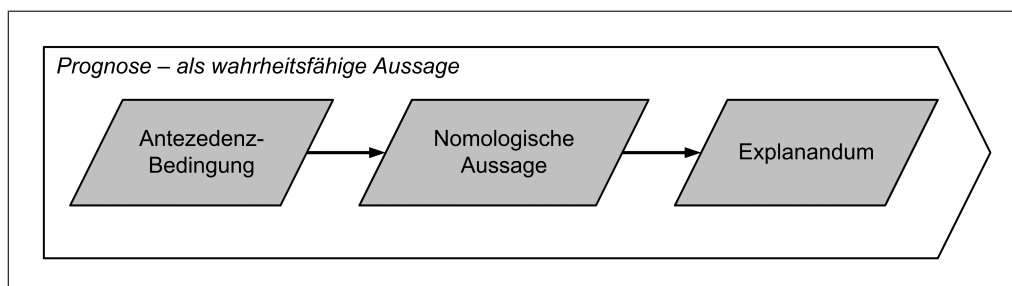


Abbildung 2.3.: Grundstruktur einer Prognose

Das grundlegende Ziel der Arbeit ist, wie bereits erwähnt, auf das Explanandum gerichtet, wobei die eben dargestellte dreistufige Struktur den vorgelagerten Weg zu dieser Prognoseaussage vorzeichnet. Die Randbedingungen, als Informationen über die Realität, können für den Sachverhalt der Arbeit direkt eruiert werden.

Dahingegen rücken die nomologischen Aussagen in Form von Hypothesen in den Mittelpunkt der Untersuchung, da sie für den Analyseschwerpunkt als nicht gegeben angesehen

werden müssen. Somit wird im Weiteren die Erarbeitung der Hypothesen sowie die logische Verknüpfung dieser zu einem theoretischen Modell angestrebt, um schließlich mit dem erarbeiteten Modell und den zugehörigen Randbedingungen die gesuchten Aussagen generieren zu können. [90, S. 84f.]

### 2.1.2. Überblick zur theoretischen Basis des PLZ-Konzeptes

Für die Erarbeitung eines derartigen Modells muss von einer theoretischen Fundierung des Produktlebenszykluskonzeptes ausgegangen werden. In dieser Beziehung stehen sich prinzipiell zwei Blickwinkel gegenüber: der mikroanalytische auf der einen und der makroanalytische auf der anderen Seite. Beide Positionen führen zu unterschiedlichen Schwerpunkten in der Modellierung sowie den Implikationen für die Prognose, warum im Folgenden die Auswahl eines Standpunktes kurz diskutiert wird.

In der mikroanalytischen Sichtweise steht im Rahmen der Adoptionstheorie die singuläre Übernahme einer Innovation durch einen Adopter im Fokus. Dabei kann es sich bei den Adoptern sowohl um Individuen als auch um Organisationen handeln. Im Sinne der vorangegangenen Aussagen zum PLZ-Konzept wird als Adoption der Absatz einer einzelnen Produkteinheit betrachtet.

Die Menge der Übernahmen, kumuliert über den Zeitverlauf, konstituiert schließlich den Produktlebenszyklus. Im Rahmen der Adoptionstheorie steht letztlich die Entwicklung eines Prozessmodells, das die produkt-, adopter- und umweltspezifischen Faktoren, die die Adoption determinieren, integriert, im Zentrum. [29, S. 50], [79, S. 21], [85, S. 47]

In der makroanalytischen Betrachtung wird von der einzelnen Übernahme abstrahiert und der „zeitliche Ausbreitungsverlauf von Innovationen“ in einer Menge von Adopter bildet den primären Fokus dieses Gebietes [158, S. 40]. Damit rückt dieser Blickwinkel prinzipiell näher an das PLZ-Konzept heran, da in letzter Konsequenz auch der PLZ eine makroanalytische Betrachtung ist. [85, S. 47]

Innerhalb des makroanalytischen Blickwinkels lassen sich nach Fischer drei Ansätze verorten, die sich von verschiedenen Seiten dem Problem nähern:

1. diffusionstheoretisch,
2. wachstumstheoretisch,
3. evolutionstheoretisch. [67, S. 27ff.]

Der evolutionstheoretische Ansatz versucht die „Evolutionsterminologie der Biologie“ auf den PLZ zu übertragen und dabei auf einer stetigen Variation oder Mutation der relevanten Größen aufzubauen. Als Anknüpfungspunkt für die vorliegende Arbeit scheidet der Ansatz jedoch aus, da es sich um ein weitgehend qualitatives Konzept handelt, wohingegen für diese Untersuchung quantitative Aussagen angestrebt werden. [67, S. 69f.]

Im wachstumstheoretischen Ansatz wird zunächst rein formal davon ausgegangen, dass der Produktabsatz in seiner Entwicklung über die Zeit schwankt. Dabei wird diese Schwankung durch gleichzeitig wirkende, aufbauende und abbauende Prozesse bestimmt. Diese gegenläufigen Prozesse, die in Abhängigkeit zur bereits erreichten Verbreitung stehen, werden in eine Form, die Gleichung 2.1 zeigt, integriert.

«Absatzrate in $t$ als Wachstumsprozess, [67, S. 55]»	$\frac{dy}{dt} = \eta(M, y) - \kappa(M, y) \quad (2.1)$
«Produktabsatz»	$y(t)$
«Wachstumsparameter»	$\eta, \kappa$
«Matrix der Einfluss- und Wirkungskoeffizienten»	$M$

Je nach zugrunde gelegter Ausgangsfunktion kann so eine Vielzahl von PLZ-Verläufen antizipiert werden und je nach Untersuchungszusammenhang können verschiedene Interpretationen der Parameter vorgenommen werden. [67, S. 51ff.]

Der diffusionstheoretische Ansatz als dritte Gruppe baut auf der einzelnen Adoption und somit auf den Erkenntnissen der Adoptionstheorie auf, um aus deren zeitraumbezogenen Aggregation Verläufe der Ausbreitung, also der Diffusion von Produkten, abzubilden. Dieser Ansatz sieht den Diffusionsverlauf als die „Summe der individuellen Adoptionsentscheidungen“. [29, S. 58]

Im Gegensatz zur Adoptionstheorie wird der Adoptionsprozess jedoch sehr stark vereinfacht, so dass bei vielen Diffusionsmodellen zum Beispiel die Kenntnisnahme einer Innovation direkt zu einer Adoption führt. Dies führt in einigen diffusionstheoretischen Modellen dazu, dass die Verbreitung des betrachteten Produktes innerhalb einer sozialen Population direkt an die Verbreitung der Information über das Produkt gekoppelt ist.

Die Grundstruktur der Diffusionsmodelle baut im Ansatz auf einem Hazard-Rate-Modell auf. Dieses Hazard-Rate-Modell versucht die bedingte, individuelle Wahrscheinlichkeit einer Übernahme darzustellen, wobei je nach Untersuchungszweck verschieden interpretierbare Variablen integriert werden können.

«Hazard-Rate-Fkt. des einfachen Bass-Modells»	$h(t) = p + q \cdot \frac{y(t)}{m} \quad (2.2)$
«Absatzrate in $t$ »	$\frac{dy}{dt} = p \cdot [m - y(t)] + \frac{q}{m} \cdot y(t) \cdot [m - y(t)] \quad (2.3)$
«Produktabsatz»	$y(t)$
«Marktpotential»	$m$
«Innovations- und Imitationskoeffizienten»	$p, q$

Im klassischen Bass-Modell zum Beispiel wird die Hazard-Rate-Funktion bzw. die Übernahmefunktion, Gleichung 2.2, linear an die aggregierte Verbreitung gekoppelt. Dies führt nach einigen Umformungen zu einem Absatz in der Periode  $t$ , der durch die Gleichung 2.3 wiedergegeben wird. [74, S. 19]

Die Abbildung 2.4 gibt verschiedene Verläufe wieder, die, bei entsprechender Variation der Parameter  $p, q$ , durch das Bass-Modell generiert werden. In diesen Parameter, die eine individuelle Adoptionswahrscheinlichkeit widerspiegeln, unterscheidet Bass die Gruppe der Adopter in Innovatoren und Imitatoren. [4, S. 418]

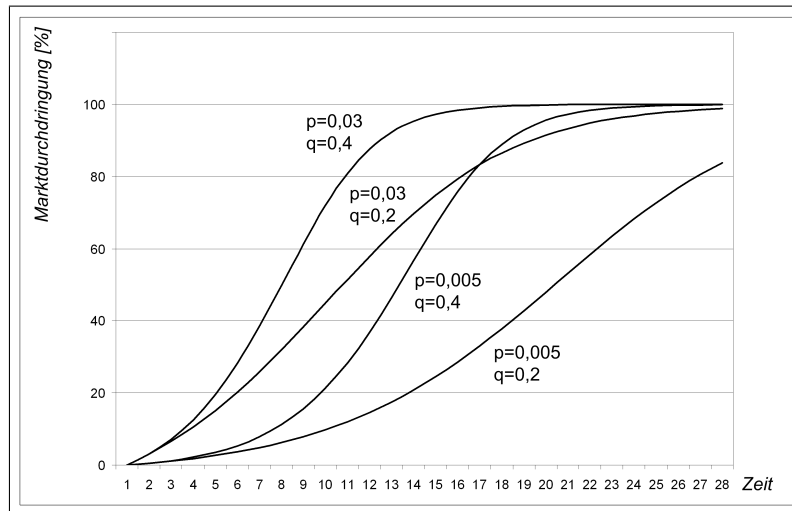


Abbildung 2.4.: Verschiedene Verläufe des Bass-Modells (Quelle: vgl. [4, S. 419])

### 2.1.3. Auswahl der grundlegenden theoretischen Herangehensweise

Vor dem Hintergrund der Konstruktion eines Prognosemodells ist von den drei verbleibenden theoretischen Ansätzen, der Adoptions-, der Wachstums- und der Diffusionstheorie, einer auszuwählen. Dabei kann vorweg genommen werden, dass alle diese Ansätze zu einem formalen Modell als Grundlage der Prognose führen, dass aber der Weg über die makroanalytische Modellierung der Wachstums- und der Diffusionstheorie auf ein empirisches, mathematisches Modell hinausläuft, wohingegen die mikroanalytische Adoptionstheorie zu einem Strukturmodell gelangt.

Die Ableitung eines empirischen, mathematischen (System-)Modells erfolgt entlang des Systemverhaltens, also entlang empirischen „Datenmaterials und einer [mathematischen] Funktion [...]“, wobei von der eigentlichen Struktur des Systems abstrahiert wird. Den Parametern dieser Modelle kann zumeist keine direkte Bedeutung in der Realität zugeordnet werden. [127, S. 6]

Dahingegen versuchen Strukturmodelle die „Einzelteile eines Systems und ihre Wechselwirkungen“ abzubilden und darauf aufbauend auf das Verhalten des Systems zu schließen. Da diese Modelle bestrebt sind, zumindest ein homomorphes, also strukturerhaltendes Abbild der Realität zu schaffen, sollten die zentralen Modellparameter eine Entsprechung in der Realität haben. [127, S. 31]

Durch die Modellierung entlang empirischen Datenmaterials (z.B. Zeitreihen) entsteht für die makroanalytischen Ansätze ein prinzipielles Problem bei deren Verwendung als Grundlage für Prognosen. Auf der einen Seite haben Untersuchungen, zum Beispiel von Heeler und Hustad [77], gezeigt, dass für die Konstruktion derartiger Prognosemodelle ausreichend lange Zeitreihen, die unter anderem die Extrempunkte der Verläufe beinhalten, vorliegen müssen. Auf der anderen Seite liegen definitionsgemäß diese Daten bei Prognoseproblemen nicht vor. Das Fehlen der Datengrundlage kann unter Umständen durch Analogie- und/oder Expertenschätzungen umgangen werden, wobei jedoch beides

kritisch zu hinterfragen ist. [145, S. 230f.]

Für das vorliegende, konkrete Untersuchungsproblem ist, wie bereits erwähnt, festzuhalten, dass sowohl die Datengrundlagen zum neuen Zugbeeinflussungssystem ETCS als auch für „ältere“ Systeme fehlen bzw. nicht in ausreichendem Umfang erhoben werden können.

Hinzu kommt, dass Analogieschätzungen entlang der Zeitreihen alter Systeme, vor dem Hintergrund der strukturellen Veränderungen im Bahnbereich der letzten Dekaden, Stichwort Bahnreform und Liberalisierung, siehe auch Kapitel 3.2, und der gesamteuropäischen, internationalen Dimensionen der Entwicklung von ETCS im Gegensatz zu früheren rein nationalen Entwicklungen, siehe Kapitel 3.3.2, fragwürdig erscheinen.

Expertenschätzungen hingegen stellen sich gerade für die abstrakten Parameter eines empirischen, mathematischen Modells als äußerst schwierig dar und manifestieren letztlich das mentale Modell der jeweiligen Experten, das wiederum für die Prognose nicht oder nur unzureichend validiert werden kann.

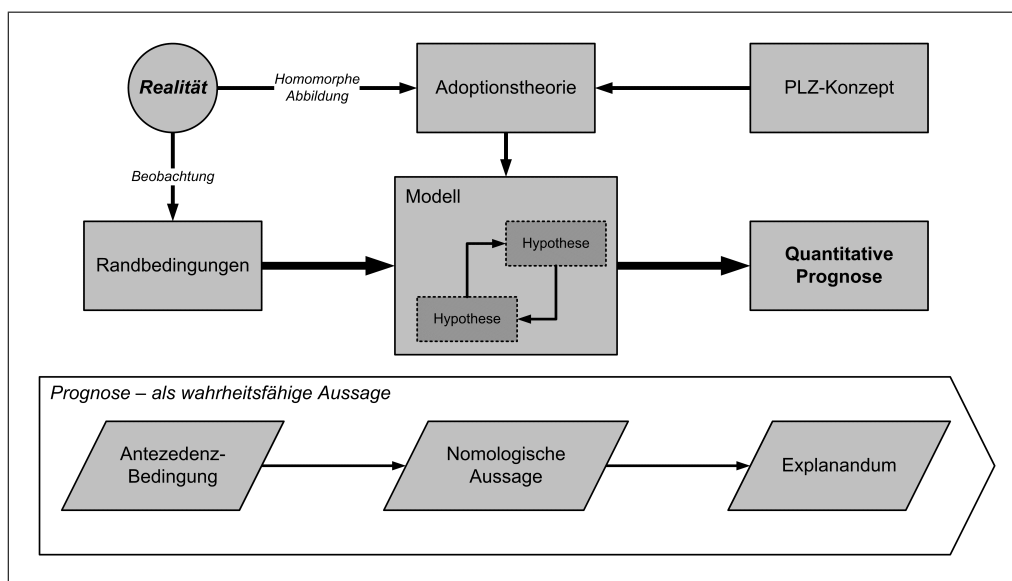


Abbildung 2.5.: Prinzipielles Vorgehen entlang der allgemeinen Prognosestruktur

Auf der Grundlage dieser Überlegungen wird somit im Weiteren ein formales Strukturmodell als Grundlage für das Prognosemodell angestrebt. Dabei baut dieses Modell auf Erwägungen der Adoptionstheorie auf und nimmt somit eine mikroanalytische Sichtweise ein. Durch die zeitraumbezogene Aggregation der individuellen Adoptionsentscheidungen werden schließlich Aussagen über Verläufe der Produktlebenszyklen auf der Makroebene erarbeitet, so wie es als Ziel für diese Arbeit aufgefasst wird.

## 2.2. Die Adoption als konstitutives Element der Mikroebene

Die Erwägungen der Adoptionstheorie, die sich, wie eingangs erwähnt, mit den Determinanten einer Adoptionsentscheidung hinsichtlich einer Innovation durch ein Individuum [79, S. 20] auseinandersetzt, sind zu einem großen Teil auf Konsumgüter bzw. Singulargüter sowie private Konsumenten als Nachfrager ausgerichtet. [158, S. 41]

Das zentrale Untersuchungsobjekt definiert Weiber als den „mental Prozess [...], den jeder Nachfrager vom ersten Gewahrwerden einer Information über eine Innovation bis zur endgültigen Adoptionsentscheidung durchläuft“ [157, S. 3]. Damit steht die binäre Übernahmeentscheidung des Adopters als „finales Element des Adoptionsprozesses“ im Fokus. [158, S. 40]

### 2.2.1. Anpassung der klassischen Adoptionstheorie

Für die Modellierung der Adoption der ZBS müssen dieser Fokus und die Betrachtungsweise des gesamten Adoptionsprozesses in mehreren Dimensionen angepasst werden. Das letztendliche Ziel dieser Anpassung besteht darin, den „mental Prozess“ einer Entscheidung der Individualebene zu modifizieren, um ein Modell des Prozesses der Adoption von Zugbeeinflussungssystemen zu erhalten.

#### Die Übernahmeentscheidung eines Investitionsgutes

Die erste Modifikation muss sich daran ausrichten, dass Zugbeeinflussungssysteme als Investitionsgüter anzusehen sind. In diese Einschätzung fließt zum einen ein, dass Zugbeeinflussungssysteme Ausrüstungskomponenten der Betriebsmittel des Produktionsprozesses der Transportdienstleistung darstellen. Zum anderen folgt sie der Definition von Schierenbeck, die Güter, die „nicht nur Output [...] sondern zugleich auch Input für nachgelagerte Produktionsprozesse darstellen“ [132, S. 2], als Investitionsgüter kennzeichnet.

Eine weiterführende Betrachtung der Zugbeeinflussungssysteme als Investitionsgüter und Teil der Betriebsmittel, damit einhergehend die Veränderung der Ziele, die mit der Adoption verfolgt werden, wird im Kapitel 3.1 entwickelt.

#### Von der Übernahme- zur Ausrüstungsentscheidung

Eine zweite Verschiebung des Blickwinkels der klassischen Adoptionstheorie liegt in der grundsätzlichen Art der Entscheidung über die Adoption eines Zugbeeinflussungssystems begründet. Auf der Seite der klassischen Theorie trifft ein Individuum eine Entscheidung über die *Übernahme* einer Innovation für sich selbst, womit der Entscheidungsträger und der Adopter, als der Unternehmer und Nutzer, eine Einheit bilden.

Auf der Seite der Zugbeeinflussungssysteme hingegen, wie die Überlegungen zur Definition des „Absatzes“ im Rahmen des PLZ-Konzeptes gezeigt haben, wird bei einer Adoption eine Entscheidung über die *Ausrüstung* einer Einheit der Verkehrsmittel getroffen. Somit fallen der Entscheidungsträger und der Adopter, als die auszurüstende Einheit, auseinander, so dass die Adoptionsentscheidung für die weitere Modellierung als Ausrüstungsentscheidung zu verstehen ist.

### **Von der Übernahme- zur Auswahlentscheidung**

Ein weiterer Unterschied zur klassischen Adoptionstheorie liegt in der Multidimensionalität der Ausrüstungsentscheidung von Zugbeeinflussungssystemen begründet. Damit kann diese nicht als binäre Übernahmeentscheidung, die lediglich über das „Ob“ zu fällen ist, abgebildet werden, sondern stellt sich als Auswahlentscheidung dar. Diese Auswahl entspringt der Vielzahl von Systemrealisierungen, die auf dem Gebiet der Zugbeeinflussungssysteme - Bsp. Europa, siehe [118] - zu finden sind und untereinander prinzipiell konkurrierende Alternativen bilden.

### **Einführung der Reversibilität**

Aus den langen Lebensdauern der Leit- und Sicherungstechnik, folglich auch der Zugbeeinflussungssysteme im Bahnwesen [136, S. 7] sowie der Verknüpfung der Ausrüstungsentscheidung mit der Abgängigkeit von Altsystemen [13, S. 6], leitet sich eine weitere Dimension der Verschiebung des Fokus der klassischen Adoptionstheorie ab. Stehen auf der einen Seite einmalige Erstkäufe bzw. Erstadoptionen im Zentrum [158, S. 1], so sind im Zusammenhang mit der ZBS-Ausrüstung Ersatz- bzw. wiederholte Ausrüstungen für eine einzelne Adoptionseinheit zu berücksichtigen. Für diese Adoptionseinheit kann somit eine Adoptionsentscheidung nicht mehr als prinzipiell irreversibel betrachtet werden.

### **Netzeffekte als zentrale Adoptionsdeterminanten**

Mit der Teilung des Betrachtungsgegenstandes in zwei Teilsysteme entlang der beiden Seiten der Betriebsmittel, Fuhrpark und Verkehrsweg, die in Kapitel 3.2.2 noch eingehender diskutiert wird, öffnet sich die für die Arbeit zentrale Dimension der Variation der klassischen Adoptionstheorie. Bei der Reflexion dieser Trennung der Zugbeeinflussungssysteme in einen fahrzeugseitigen und einen netzseitigen Teil, die im Weiteren als Gesamtsystem immer als zweiteiliger Systemverbund aufgefasst werden, zeigt sich eine enge, in Grenzen variable, aber nicht auflösbare Nutzenbeziehung zwischen den Fahrzeugen und der Strecke, so dass nur der Systemverbund Nutzen stiften kann.

Damit gewinnen für die Beschreibung des Gesamtsystems und der Teilsysteme die Begriffe „Komplementarität“ und „Kompatibilität“ an Bedeutung. Während die Komplementarität die Austauschbeziehung der beiden Teilsysteme beschreibt [135, S. 74], die jedes für sich isoliert betrachtet keinen Nutzen hat [87, S. 93], legt die Kompatibilität die Grundlage für diese Austauschbeziehung [42, S. 676]. Hierbei liegt Kompatibilität, Farrell und Saloner folgend, dann vor, wenn Produkte oder Teilsysteme ihrem Design nach zusammenwirken können [63, S. 1f.]. Dieser Ansatz für Kompatibilität wird in Kapitel 3.2.4 zum Begriff der „technischen Kompatibilität“ weiterentwickelt.

In dem vorliegenden Kontext führen beide Begriffe die weiteren Betrachtungen auf das Gebiet der Netzeffekttheorie, da zum Beispiel Weiber Güter, die „aufgrund ihrer Kompatibilität und ihres komplementären Charakters in einer [...] Nutzenbeziehung stehen [...]“, als Netzeffektgüter bezeichnet [158, S. 42]. Nach dieser Definition fallen Zugbeeinflussungssysteme in die Kategorie der Netzeffektgüter.

Die weitere Spiegelung der zweiteiligen ZBS vor dem Hintergrund der Netzeffekttheorie erfolgt an den drei Güterkategorien, die sich auf dieser Ebene herauskristallisiert haben: die Singulär-, die Netzeffekt- und die Systemgüter. Die Unterscheidung dieser Kategorien vollzieht sich entlang der Begriffspaare originärer und derivativer Nutzen sowie direkter und indirekter Netzeffekte. [134, S. 11ff.]

Den Ausgangspunkt bilden die Singulärgüter, die für den Nachfrager lediglich originären Nutzen stiften. Dies bedeutet, dass sie keine Interaktionsbeziehungen zu anderen gleichartigen oder komplementären Gütern eingehen, um weiteren Nutzen zu entfalten. Daraus folgt, dass für die Nutzung des Gutes dessen Verbreitungsgrad irrelevant ist. [158, S. 41]

Als Beispiel sei hier eine Tasse angeführt, die auf der Nachfrageseite für jeden Nutzer einen konstanten Nutzen stiftet, unabhängig davon, ob eine oder eine Million Tassen in Benutzung sind.

Dagegen liegt ein derivativer Nutzen im Sinne der Netzeffekttheorie vor, wenn ein Gut diesen Nutzen nur in einer Interaktionsbeziehung mit anderen Gütern oder Nutzern erbringt. Besteht eine derartige Interaktionsbeziehung, sind in der Nutzung des Gutes Netzeffekte zu beobachten, wobei der Grad der Nutzenstiftung von der Verbreitung des Gutes abhängig ist.

Hess bezeichnet dies als positive Rückkopplung in Abgrenzung zur negativen Rückkopplung, die nach neoklassischer Theorie bei steigender Verbreitung eines Gutes in einen sinkenden Wert mündet. [84, S. 96]

Als Bild zeichnet Weiber ein fiktives oder physisches Netzwerk, über das die (Einzel-) Güter in Verbindung stehen und das mit jedem zusätzlichen Nutzer mehr Nutzen für alle Beteiligten bereitstellt [158, S. 41]. Die Abbildung 2.6 versucht die eben angesprochenen Aspekte in einem Wachstumskreislauf zusammenzufassen.

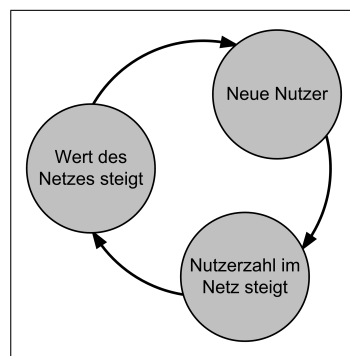


Abbildung 2.6.: Netzeffektinduzierte Rückkopplung (Quelle: vgl. [84, S. 97])

Für die weitere Differenzierung der Netzeffekte, die eine Adoptionsentscheidung stark beeinflussen können, hat sich in der Netzeffekttheorie die Unterscheidung in direkte und indirekte Effekte etabliert.

Direkte Netzeffekte entstehen auf der Nachfragerseite, wenn die Nutzer an einem zumeist realen Netzwerk beteiligt sind, das durch zusätzliche Teilnehmer direkt an Interaktionsmöglichkeiten und damit an Nutzenpotential für alle bestehenden Netzteilnehmer



gewinnt. [7, S. 37]

Fast alle Kommunikationsnetzwerke, wie zum Beispiel das Telefonnetz, können für die direkten Netzeffekte als Beispiel dienen, da die Kommunikation als die angestrebte Interaktionsform für einen singulären Nutzer nicht zielführend ist und die Zahl der Interaktionsmöglichkeiten, die eine eigenständige Wertkategorie für den Nutzer bildet, direkt mit der Zahl der am Netzwerk beteiligten Nutzer verknüpft ist.

Indirekte Netzeffekte dahingegen entspringen der Nutzung von komplementären Gütern. Die Zunahme der Menge von Nutzern eines Gutes bewirkt hier, dass das Angebot an komplementären Gütern ausgeweitet wird und damit wiederum der Nutzen des Ausgangsgutes für alle Nutzer steigt. [73, S. 1335]

Der sich selbst verstärkende Kreislauf von vorhandener Hardware und angebotener Software, von Katz und Sharpio als Hardware/Software-Paradigma bekannt gemacht, kann für die indirekten Netzeffekte als Beispiel herangezogen werden. [86, S. 424]

Strikt zu trennen von diesen indirekten Netzeffekten sind „Economies of Scale“, die auf der Anbieterseite bei gesteigerter Produktion von komplementären Gütern entstehen, sinkende Stückkosten bewirken und an die Nachfrager in Form von sinkenden Preisen weitergegeben werden. [92, S. 7f.]

Bei der Zuordnung von einzelnen Effekten zu bestimmten Produktgruppen ist festzustellen, dass mehrere Effekte gleichzeitig auftreten und sich überlagern können. So hat z.B. ein Textverarbeitungsprogramm im Sinne des Hardware/Software-Paradigmas indirekte Netzeffekte zu verzeichnen. Wenn jedoch ein Nutzer mit anderen Nutzern eines Textverarbeitungsprogramms in eine Austauschbeziehung tritt oder treten möchte, entwickeln sich direkte Netzeffekte, da mit der Menge der Nutzer von kompatibler Software die Menge der potentiellen Interaktionspartner zunimmt, was wiederum den Nutzen steigert. [98, S. 51]

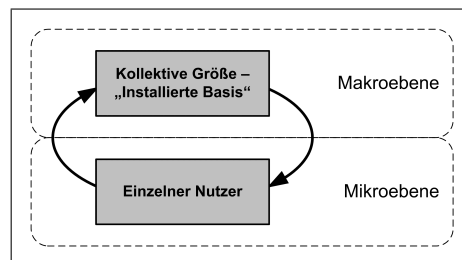


Abbildung 2.7.: Mikro- und Makroebene (Quelle: vgl. [134, S. 51])

Festzuhalten bleibt für beide Effekte, dass die Menge von gleichartigen, untereinander kompatiblen (direkte Netzeffekte) bzw. komplementären (indirekte Netzeffekte) Gütern, im Begriff der „Installierten Basis“ beschrieben, entscheidenden Einfluss auf den Nutzen eines Gutes für einen einzelnen Anwender und damit auch auf die Übernahmeentscheidung und die Diffusion der Güter durch potentielle Anwender hat. Dabei können, wie Abbildung 2.7 zeigt, der einzelne Anwender auf einer Mikroebene und die „Installierte Basis“ auf einer Makroebene verortet werden. [134, S. 51]

In der Zusammenführung von derivativem und originärem Nutzen sowie indirekten

und direkten Netzeffekten entwirft Weiber die eingangs angesprochenen Güterkategorien der Singulär-, Netzeffekt- und Systemgüter.

Liegen bei Singulärgütern keinerlei Netzeffekte und lediglich originäre Nutzenaspekte vor, sind bei Netzeffektgütern originäre und derivative Nutzenaspekte und bei Systemgütern nur derivative Nutzenaspekte zu beobachten. Aus den derivativen Nutzenkomponenten resultieren bei Netzeffektgütern indirekte Netzeffekte wohingegen bei Systemgütern direkte Netzeffekte dominierend sind. Tabelle 2.1 fasst die Unterscheidungen, die für die weitere Untersuchung ausschlaggebend sind, nochmals zusammen.

Tabelle 2.1.: Netzeffekt- und Systemgüter [vgl. 158, S. 44]

<b>Netzeffektgüter</b>	<b>Systemgüter</b>
(1) originärer und derivativer Nutzen	(1) (nur) derivativer Nutzen
(2) Nutzensteigerung durch Installierte Basis der Komplementärgüter	(2) Nutzensteigerung durch Installierte Basis des gleichen Gutes
(3) Indirekte Nutzensteigerung	(3) Direkte Nutzensteigerung
(4) Verknüpfung über ein fiktives Netzwerk	(4) Verknüpfung über ein physisches Netzwerk
(5) Dominanz indirekter Netzeffekte	(5) Dominanz direkter Netzeffekte
(6) Indirekter Netzeffekt durch Kaufakt	(6) Direkter Netzeffekt (nur) durch Nutzung

Wie das Beispiel der Textverarbeitung gezeigt hat, kann sich die Einordnung einer einzelnen Produktgruppe in dieses idealtypische Schema jedoch mitunter schwierig gestalten. Bei der Betrachtung von Zugbeeinflussungssystemen im Kontext der Netzeffekttheorie deutet sich an, dass die Zuordnung in das Schema von Weiber ebenfalls problematisch ist.

Für die weitere Charakterisierung der ZBS vor dem Hintergrund der Netzeffekttheorie wird im Folgenden eine Einordnung der Systeme in die beschriebenen Güterkategorien angestrebt.

Das Gesamtsystem der Zugbeeinflussungssysteme ist, wie bereits angesprochen, als Systemverbund aus zwei Teilsystemen entlang der Betriebsmittel, Fuhrpark und Infrastruktur, zu sehen. Dieser Sachverhalt, der zu den Begriffen Kompatibilität und Komplementarität führt, lässt sich unter Nutzung des Schemas von Schoder in einer Mikro- und einer Makroebene darstellen, Abbildung 2.8.

Bei den Individuen handelt es sich nun jeweils um einzelne Kilometer oder Fahrzeuge. Dabei ist zu beachten, dass die ausschlaggebende Installierte Basis, die zur Nutzenstiftung einer Einheit herangezogen wird, durch die Makroebene der komplementären Gegenseite gebildet wird. Für die Fahrzeuge ist somit die Menge der kompatiblen Netzkilometer und für die Kilometer die Menge der kompatiblen Fahrzeuge bestimmend.

In der Anwendung dieser Sichtweise auf den ersten Punkt der Güterkategorisierung nach Weiber wird deutlich, dass ein ZBS-Teilsystem nur eine derivative Nutzenkomponente hat, da ein Teilsystem allein keinerlei Nutzen entfalten kann.

Im Hinblick auf den zweiten Punkt der Kategorisierung kann, durch die Fokussierung der Nutzenbetrachtung auf die Installierte Basis der Komplementärgüter, davon ausgegangen werden, dass diese Installierte Basis auch für Nutzensteigerungen im Sinne der

Netzeffekttheorie verantwortlich ist. Damit liegt eine indirekte Nutzensteigerung im Sinne der Einordnung vor, da die Steigerung gespiegelt über die Installierte Basis erfolgt.

Es muss jedoch herausgestellt werden, dass diese Einflüsse der komplementären Güter bei Zugbeeinflussungssystemen innerhalb von Kapazitätsgrenzen stattfinden, da ein Netzabschnitt nur bis zu einer maximalen Auslastung befahren werden kann [114, S. 19f.] und ein Fahrzeug pro Zeitperiode nur eine begrenzte Strecke, also eine Menge an Kilometern, zurücklegen kann.

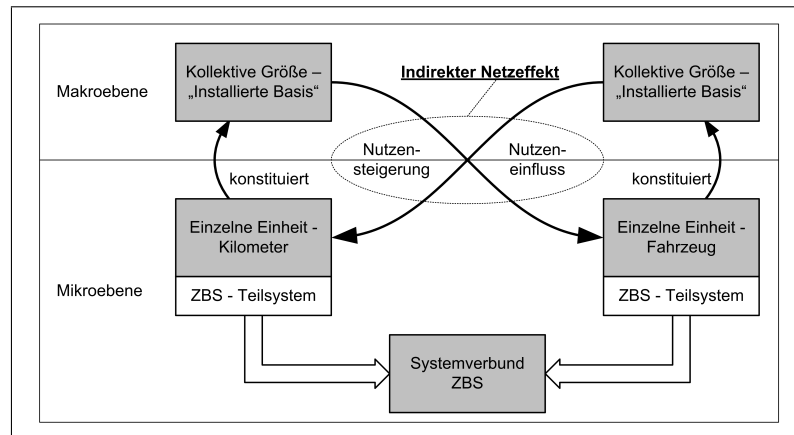


Abbildung 2.8.: Ebenenmodell für indirekte Netzeffekte der ZBS

Für den vierten Punkt, die Charakterisierung des Netzwerkes, steht die Verknüpfung der komplementären Teilsysteme im Mittelpunkt. Hierbei ist für die ZBS festzuhalten, dass die Verknüpfung über ein fiktives Netzwerk stattfindet, das durch gleichartige, kompatible Systemausrüstungen definiert wird. Eine Menge an Kilometern wird somit, vom Fuhrpark aus gesehen, durch eine kompatible Ausrüstung zu einem befahrbaren Netz. Analog dazu wird eine Menge von Fahrzeugen für einen Kilometer durch kompatible Systemtechnik zu einem kompatiblen Fuhrpark.

Zusammenfassend für die Punkte eins bis vier konkretisiert sich im Punkt fünf, dass indirekte Netzeffekte als klar dominant für Zugbeeinflussungssysteme anzunehmen sind.

Für den letzten Punkt ist abschließend hervorzuheben, dass für die indirekten Netzeffekte der ZBS nicht der Kauf- oder Installationsakt entscheidend ist, sondern dass die Teilsysteme, um für die Interaktionsbeziehungen wirksam zu sein und einen Nutzeneffekt zu initiieren, genutzt werden müssen. Somit ist die Nutzung für die indirekten Netzeffekte in Verbindung mit ZBS eine grundlegende Voraussetzung.

In der Zusammenfassung der vorangegangenen Aussagen zeigt sich, dass ein ZBS-Teilsystem, so wie es für diese Arbeit aufgefasst wird, der Kategorie der Netzeffektgüter zuzurechnen ist, aber in den Punkten eins und sechs Eigenschaften von Systemgütern aufweist.

Es bietet sich somit an, eine dritte Kategorie zu etablieren, die als „bedingte Netzeffektgüter“ grundsätzlich an die herkömmlichen Netzeffektgüter angelehnt ist, aber hiervon abweichend lediglich über eine derivative Nutzenkomponente verfügt und allein durch die

Nutzung der komplementären Systeme oder Güter Netzeffekte bedingt.

Mittels dieser neuen Güterkategorie lassen sich ZBS eindeutig im Gebiet der Netzeffekttheorie verorten. Dies bedeutet für die Modellierung im Folgenden eine weitere Verschiebung des Fokus der klassischen Adoptionstheorie.

Zum einen wird deutlich, dass die Modellierung der Adoption für beide Teilsysteme getrennt zu betrachten ist und dass zum anderen die Verbreitung von kompatiblen Systemen als komplementärer Gegenpart in die Modellierung der Nutzenkomponente einfließen muss.

Weiterhin lässt sich aus Sicht der Netzeffekttheorie der Begriff der „Kritischen Masse“ einführen, der im Zusammenhang mit der Migration von Zugbeeinflussungssystemen des Öfteren zur Sprache kommt, siehe zum Beispiel Kapitel 7.2.2.4.2 Anhang Entscheidung 2006/679/EG [47] oder den Artikel von Veider [152].

Dabei ist die Kritische Masse im Zusammenhang mit der Installierten Basis zu sehen, wo sie eine Mindestanzahl von Nutzern beschreibt, die vorliegen muss, damit eine stabile Vorteilhaftigkeit des jeweils betrachteten Systems entsteht. [158, S. 45]

Für die ZBS bedeutet dies, dass die Kritische Masse bzw. die stabile Vorteilhaftigkeit für ein Teilsystem direkt abhängig ist von der Masse des komplementären Teilsystems. Damit zerfällt die Betrachtung der Vorteilhaftigkeit für ein System in eine Betrachtung der beiden Teilsysteme.

Tabelle 2.2.: Gegenüberstellung von Adoptionstheorie und ZBS-Übernahmeprozess

Klassisches Konzept der Adoption	Anvisierte ZBS-Adoption
(1) Einheit von Entscheider und Adopter	(1) Trennung von Entscheider und Adopter
(2) Fokus auf Konsumgüter	(2) ZBS als Investitionsgut
(3) binäre Übernahmeentscheidung	(3) multidimensionale Auswahlentscheidung
(4) Irreversibilität	(4) prinzipielle Reversibilität
(5) Einmaligkeit der Entscheidung je Einheit	(5) Mehrfachentscheidungen im Zeitverlauf
(6) Kaufakt relevant	(6) Installation & Nutzung relevant
(7) Singulärgut	(7) „bedingtes“ Netzeffektgut
–	(7a) Komplementarität und Kompatibilität
–	(7b) Rückkopplung - Mikro- und Makroebene
–	(7c) mehrdimensionale Kritische Masse-Effekte

Zusätzlich zu dieser Zweiteilung sind drei Aspekte hervorzuheben. Zum Ersten, da die Kritische Masse abhängig von den Kosten eines Systems ist, ist sie an dieser Stelle zugänglich für Manipulationen zum Beispiel durch Förderungen bestimmter Systemlösungen. Zum Zweiten kann mit Vorschriften von Systemen das Erreichen der Kritischen Masse dieser Systeme forciert werden. Zum Dritten besitzen, das zeigen auch Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit (siehe z.B. Kapitel 4.2), bestimmte Einheiten, insbesondere Kilometer, aber auch bestimmte Ausrüstungskonfigurationen einen stärkeren Einfluss hinsichtlich der Kritischen Masse als andere Einheiten.

Somit werden Betrachtungen zur Kritischen Masse von Zugbeeinflussungssystemen zu einem multidimensionalen Problem und lassen sich schwer an einfachen Ausrüstungszah-

len fest machen.

Letztendlich ist für die Modellierung des Entscheidungsprozesses einer einzelnen Übernahme von Zugbeeinflussungssystemen im Sinne der Adoptionstheorie zusammenzufassen, dass das klassische Adoptionsmodell an mehreren Punkten zu modifizieren ist. Tabelle 2.2 versucht in einer Gegenüberstellung diese Einflusspunkte aus den letzten Kapiteln zusammenzutragen.

### 2.2.2. Der Investitionsprozess als Abbildungskonzept

Für die Integration dieser Einflusspunkte muss das konsumgüterorientierte Prozessbild einer Adoptionsentscheidung ersetzt werden. Zentrales Anliegen ist es somit, ein Modell eines Prozesses zu konstruieren, das eine durch Netzeffekte beeinflusste Ausrüstungsentscheidung widerspiegeln kann.

Da ein ZBS, wie bereits angesprochen, als Investitionsgut zu betrachten ist, wird die Ausrüstungsentscheidung in der weiteren Modellierung als Investitionsentscheidungsprozess aufgefasst.

Damit wird das eingangs eingeführte Bild eines (Produkt-)Absatzes innerhalb des Produktlebenszyklus über das Bild einer Ausrüstung in das Bild einer Investition überführt. Hierzu soll folgende Definition einer Investition, die sich an die Definition von Perridon und Steiner [124, S. 29] anlehnt, gelten.

Die *Investition* in ein Zugbeeinflussungssystem wird als zielgerichteter Einsatz von finanziellen Mitteln zur Ausrüstung einer zugrunde liegenden Betriebsmitteleinheit, Fahrzeug oder Streckenkilometer, mit einem oder mehreren Zugbeeinflussungssystemen aufgefasst.

Der gesamte Prozess der Entscheidung über diese Investition, den eine wirtschaftliche Einheit trifft, die über die Betriebsmitteleinheiten zur Produktion von Transportdienstleistung verfügt, wird als Investitionsprozess verstanden.

Anschließend an diese Definition muss es im Weiteren Ziel der Modellierung sein, das generische Bild eines Investitionsprozesses an den Beobachtungsgegenstand anzupassen und die im Zusammenhang mit der Adoptionstheorie herausgearbeiteten Aspekte einfließen zu lassen.

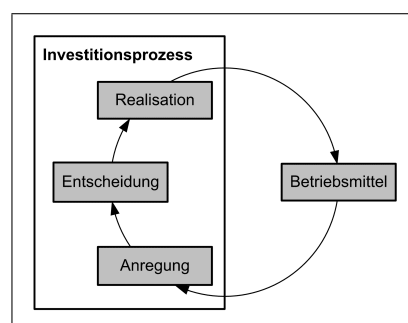


Abbildung 2.9.: Kreislauf des Investitionsprozesses

Für eine erste Strukturierung des Investitionsprozesses, der einen Entscheidungsprozess darstellt, wird von einer Phaseneinteilung in „Entscheidungsanregung“, „Entscheidungsfindung“, die Entscheidung im engeren Sinn und „Entscheidungsrealisation“ ausgegangen. [124, S. 30f.]

Weiterhin wird, da es sich bei einer Investition in ein Zugsicherungssystem um eine Investition in die Betriebsmittel handelt und der Zustand dieser wiederum alle nachfolgenden Investitionsentscheidungen determiniert, von einem Kreislaufmodell ausgegangen, wie es Bild 2.9 darstellt.

### Anregung als Ausgangspunkt des Entscheidungsprozesses

Für die Darstellung der Entscheidungsanregung werden prinzipiell vier Quellen als die zentralen Treiber von ZBS-Investitionen betrachtet und in die Modellierung integriert. Diese fließen entweder aus der - jeweils aktuellen - Struktur der Betriebsmittel oder werden durch exogene Beeinflussung hervorgerufen.

Die erste Quelle der Anregung bildet die Investitionen als Ersatzinvestitionen entlang der Alterung der ZBS ab. Hierbei wird eine indikative Altersvariable der bestehenden Zugbeeinflussungssysteme sowie eine definierte Nutzungsdauer verglichen und durch abgängige Systeme ein Investitionsprozess für deren Ersatz initiiert.

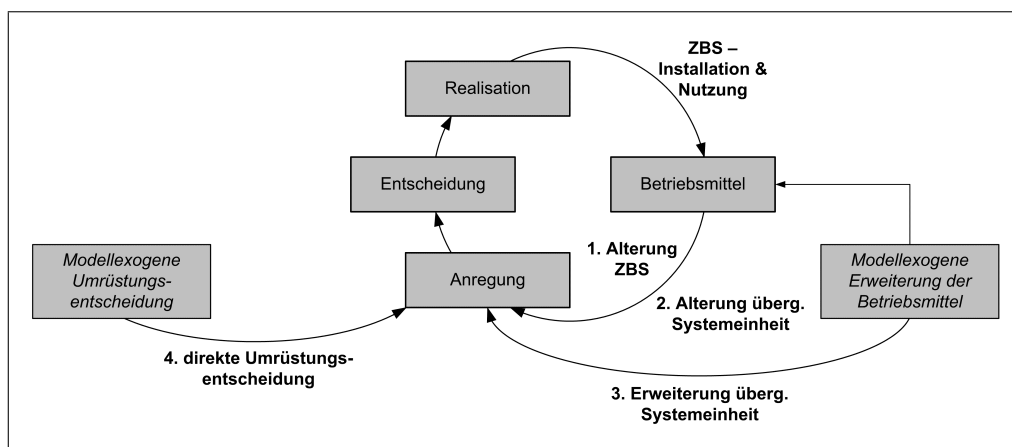


Abbildung 2.10.: Differenzierter Kreislauf des Investitionsprozesses

Im Gegensatz dazu wird im zweiten und dritten berücksichtigten Ursprung einer Investition ein Entscheidungsprozess erfasst, der sich an die Beschaffung bzw. Neuinstallation einer Betriebsmitteleinheit, also eines Fahrzeugs oder eines Kilometers, anschließt. Diese Beschaffung kann als Ersatzinvestition mit Bezug zur Alterung oder als Erweiterungsinvestition der Betriebsmittel auftreten und ist damit in zwei Ausprägungen zu berücksichtigen.

In die vierte zu erfassende Art der Anregung eines Investitionsprozesses fließt die Annahme ein, dass auch Prozesse jenseits von Ersatz- oder Erweiterungsinvestitionen, also abseits der Struktur der übergeordneten Betriebsmitteleinheiten sowie der Alterung der

ZBS, somit für das Modell exogen initiiert werden. In der Realität kann hier das Bild einer direkten Umrüstungsaktion gesehen werden.

### **Realisierung als Endpunkt des Entscheidungsprozesses**

Unabhängig vom Ursprung der Anregung des Investitionsprozesses wird für die Modellierung weiterhin angenommen, dass die Realisierung in einer funktionsfähigen, abgeschlossenen Ausrüstung der anvisierten Betriebsmitteleinheit(-en) mit dem oder den im Prozess ausgewählten Zugbeeinflussungssystemen besteht. Demzufolge verändert jede Realisierung die Ausrüstungsstruktur der Betriebsmittel, was wiederum jede weitere Investitionsentscheidung beeinflusst.

Die Abbildung 2.10 versucht sowohl die Anregungen als auch die Realisation in das Kreislaufschema des Investitionsprozesses zu integrieren.

### **Investitionsrechnung als zentrales Strukturierungselement**

Die verbleibende Phase der Entscheidungsfindung ist vor dem Hintergrund einer geeigneten Abbildung der Investitionsentscheidung weiter zu differenzieren. Dazu müssen die Prozessstufen „Zieldefinition“, „Alternativensuche“, „Datenerhebung“ und „Datenaufbereitung“ sowie „Bewertung“, „Rangfolgebildung“ und schließlich „Auswahl“ bzw. „Entscheidung“ berücksichtigt werden. [vgl. 124, S. 31]

Um die konkrete Auswahlentscheidung zu operationalisieren, kommt eine Methode der Investitionsrechnung zur Anwendung. Mit dieser Investitionsrechnungsmethode wird die Prozessstufe der „Bewertung“ in ein „mathematisch akademisches Modell“ überführt. Das „quantitative Ergebnis dieses Modells“ dient schließlich „als Basis für [die] Investitionsentscheidung“. [126, S. 9]

Damit bereitet die Investitionsrechnung die Phase der „Rangfolgebildung“ und „Auswahl/Entscheidung“ vor. Unabhängig von der konkreten Wahl einer Methode beeinflusst die Verwendung der Investitionsrechnung als Konstrukt auch die vorgelagerten Phasen und prägt somit den gesamten Entscheidungsprozess bzw. dessen Abbildung. Die Darstellung 2.11 versucht dies zu skizzieren.

Ging die Wahl eines Investitionsprozesses als Modellbild der Adoptionsentscheidung bereits mit einer Fokussierung der Entscheidungsziele auf die betriebswirtschaftlichen Ziele der entscheidenden wirtschaftlichen Einheit einher, so schränkt die Investitionsrechnung die Zieldefinition weiter auf quantifizierbare, monetäre Zielkriterien ein. Damit wird der Investor für die weitere Modellierung als „homo oeconomicus“ und „Nutzenmaximierer“ charakterisiert. [126, S. 12]

Mit einigen Investitionsrechnungsmethoden, zum Beispiel der Nutzwertanalyse, gelingt zwar die Quantifizierung von nicht-monetären Kriterien, synonym „Imponderabilien“ [91, S. 22f.], um diese dann einer Investitionsrechnung zugänglich zu machen.

Und auch weitere Bewertungsmethoden, die mit Bezug zum Transportwesen nicht-monetäre Größen berücksichtigen, liegen zum Beispiel mit der „Gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik“ des Bundesverkehrswegeplans 2003 [20] oder dem „Standardisierte Bewertungsverfahren“ des ÖPNV [78] vor. Bei diesen Methodiken handelt es sich um ge-

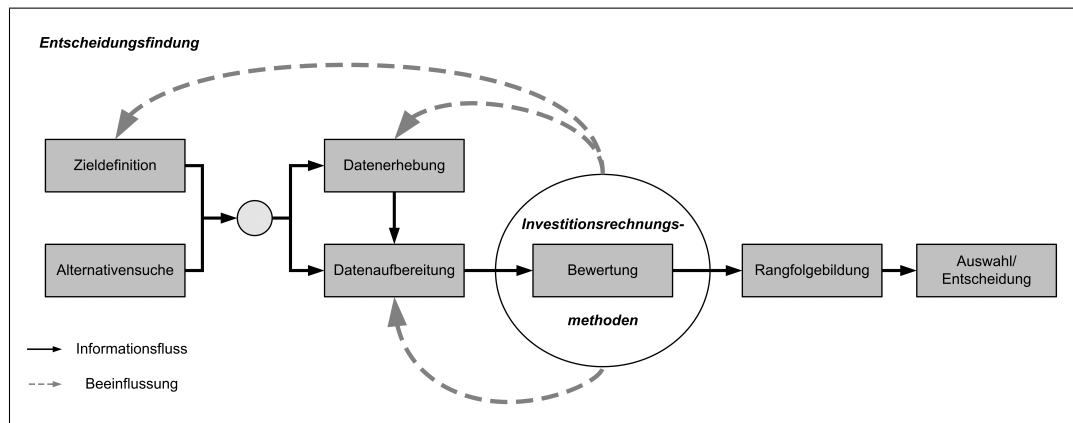


Abbildung 2.11.: Die Entscheidungsfindung als Prozesskette

samtwirtschaftlich ausgerichtete Verfahren der Verkehrswegeplanung, die versuchen, alle Faktoren und Effekte von verkehrlichen Großprojekten mit in die Bewertung einzubeziehen.

Für die weitere Modellierung werden jedoch lediglich „quantitative Verfahren der Investitionsrechnung“ [126, S. 10] berücksichtigt. Die gesamtwirtschaftlichen Verfahren der Verkehrsplanung scheiden aus, da die Entscheidung über die Ausrüstung einer Betriebsmitteleinheit mit Zugbeeinflussungssystemen eine betriebswirtschaftliche Entscheidung einer einzelnen Wirtschaftseinheit darstellt und sich somit in einem anderen Rahmen vollzieht. Die weiterführenden Verfahren der Investitionsrechnung, die Imponderabilien mittels „subjektiver Zahlenwerte“ [126, S. 10] quantifizieren, werden aufgrund dieser Subjektivität nicht einbezogen.

Wie das Kapitel 3.2 nochmals aufzeigt, wird für den Verkehrsbetrieb, als das handelnde wirtschaftliche Subjekt, angenommen, dass „bei der Leistungserstellung und -verwertung das Gewinnmaximum“ [160, S. 6] angestrebt wird. Hering prägt hierfür den Begriff des „Totalgewinns“, der die Quantifizierung der „oberste[n] strategische[n] Zielsetzung“, die „langfristige Erhaltung der Ertragskraft“ eines Unternehmens darstellt. [81, S. 11]

Damit kann die Investitionsrechnung, die auf die Betriebsmittel ausgerichtet und somit Teil des betriebswirtschaftlichen Handelns des wirtschaftlichen Subjektes ist, auf dieses eindimensionale, quantitative, monetäre Ziel beschränkt werden.

Die Operationalisierung des Begriffs des „Totalgewinns“ für die Investitionsrechnung erfolgt über das in der modernen Literatur der Investitionsrechnung dominierende Konzept der Zahlungsströme. Damit werden die Nachteile, die aus der Verwendung eines gewinn- oder umsatzorientierten Konzeptes erwachsen, wie zum Beispiel vielfältige Abgrenzungsprobleme oder die Möglichkeit der Manipulierbarkeit der Größen, vermieden. Außerdem werden im „zahlungstrombasierten Konzept“ die Zahlungszeitpunkte für die verschiedenen Investitionsalternativen erfasst. [126, S. 10]

Somit kann eine Investition parallel zu der oben getätigten Definition als „ein Zahlungsstrom, der mit einer Auszahlung beginnt“ definiert werden. [126, S. 10]

Mit der Verwendung von Zahlungsströmen als Charakteristikum einer Investitionsal-



ternative wird häufig, insbesondere für die Einzahlungen, die Zurechenbarkeit kritisch gesehen. Für die Modellierung wird dieses Zurechnungsproblem dadurch umgangen, dass für alle Investitionsalternativen die jeweilige Gesamtsituation einer Betriebsmitteleinheit berechnet wird und der Vergleich dieser Gesamtsituationen für die Investitionsentscheidung ausschlaggebend ist. [124, S. 85]

Hinsichtlich des eindimensionalen, quantitativen Ziels des Totalgewinns, das mit einer Investition verfolgt wird und das mittels der Zahlungsströme, die diese Investition verursacht, quantifiziert und beurteilt wird, können drei prinzipielle Konzepte der Betrachtung unterschieden werden:

- „Vermögenskonzepte,
- Entnahmekonzepte und
- Renditekonzepte.“ [126, S. 12]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es Ziel jedes Investors im Sinne dieser Arbeit ist, den Zahlungsstrom, den die Investitionsalternativen verursachen, durch die Auswahl einer Alternative zu maximieren. Dabei findet die unterschiedliche Struktur dieser Zahlungsströme in den eben angeschnittenen Konzepten Berücksichtigung. Die Wahl eines Konzeptes, die für die jeweilige Konsumpräferenz des Investors steht, beeinflusst letztlich auch die Wahl einer Investitionsrechnungsmethode. [81, S. 22]

Entlang der Zahlungsströme, die für alle Investitionsalternativen als nachschüssig angenommen werden, kann der Begriff der Vorteilhaftigkeit der betrachteten Investitionsalternativen eingeführt werden. Ziel der Investitionsrechnung, wie sie in den vorliegenden Ausführungen verstanden wird, ist es, Aussagen über die Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen, auf Basis der zugrunde gelegten Kriterien und Modelle zu generieren. In diesem Kontext kann zwischen einer absoluten und einer relativen Vorteilhaftigkeit unterschieden werden.

Die absolute Vorteilhaftigkeit einer Investitionsalternative signalisiert dem Investor, dass die Investition als Anlageform, über den gesamten Investitionshorizont betrachtet, einen nicht negativen Zahlungsstrom hervorruft.

Dagegen zielt der Begriff der relativen Vorteilhaftigkeit auf den Vergleich mehrerer Investitionsalternativen ab. Ohne dass eine absolute Vorteilhaftigkeit vorliegen muss, gilt eine Investitionsalternative als relativ vorteilhaft, wenn sie einen größeren Zahlungsstrom im Vergleich zu den anderen Alternativen verursacht. Damit bildet der Begriff der relativen Vorteilhaftigkeit die Grundlage für Wahlentscheidungen sowie für die im Investitionsprozess nachfolgenden Phasen der „Rangfolgebildung“.

Bevor im folgenden Kapitel eine konkrete Methode für die Modellierung ausgewählt wird, sind noch zwei prinzipielle Aspekte anzuschneiden.

In den ersten Aspekt fließt ein, dass, da die gesamte Investitionsentscheidung über die Ausrüstung von Betriebsmitteleinheiten mit Zugbeeinflussungssystemen als eine Wahlentscheidung aufgefasst wird, die zu betrachtenden Investitionsalternativen als echte, sich ausschließende Alternativen mit feststehender, wenn möglich gleicher Nutzungsdauer zu modellieren sind. [91, S. 5f.]

Um diese Voraussetzung zu schaffen, werden die einzelnen ZBS in allen möglichen Kombinationen zu Systempaketen zusammengefasst. Die Menge dieser Pakete bildet schließlich den Alternativenraum, der für die Investitionsentscheidung zur Verfügung steht. Damit werden nicht einzelne Systeme, sondern Systempakete im Prozess der Investitionsentscheidung bewertet, ausgewählt und installiert.

Für diese Systempakete wird eine einheitliche Nutzungsdauer festgelegt, so dass echte Investitionsalternativen mit einheitlicher Nutzungsdauer vorliegen. Dabei ist die Festlegung einer „Paket-Nutzungsdauer“ jedoch eindeutig als Annahme zu kennzeichnen, da in der Realität verschiedene Systeme, auch wenn sie gleichzeitig in einem Fahrzeug oder einem Kilometer verbaut werden, durchaus unterschiedliche Nutzungsdauern aufweisen können.

Der zweite Aspekt bezieht sich auf die Datenerhebung und -aufbereitung als die der Investitionsrechnung vorgelagerten Prozessschritte, die in einem dreifachen Spannungsverhältnis zwischen der Abbildung des Zustandes bzw. der Struktur der Betriebsmittel zum Zeitpunkt der Investition einerseits, der Prognose der Wirkungen der einzelnen Investitionsalternativen andererseits sowie letztlich den Erfordernissen der jeweiligen Investitionsrechnungsmethode stehen.

Der erste Punkt, die Abbildung des Zustands der Betriebsmittel bzw. die gesamte Situation im Produktionsprozess der Betriebsleistung orientiert sich an den Schwerpunkten, die im vorangegangenen Kapitel für die Adoptionsentscheidung über die ZBS-Ausrüstung identifiziert wurden. Hierbei steht die Verbreitung der jeweils komplementären und kompatiblen Systemtechnik und der damit verbundenen Abhängigkeit des Nutzen im Vordergrund.

Der zweite Punkt, die Prognose der zentralen Zustandsgrößen und Wirkungen der Realisierung der Investitionsalternativen über den gesamten Investitionshorizont, wird in die Modellierung durch zwei wählbare Verfahren integriert. Zum einen die bivariate lineare Regressionsanalyse und zum anderen das Verfahren einer einfachen Wertfortschreibung, wobei eine weitere Betrachtung beider Verfahren zu Beginn des Kapitels 3.4 vorgenommen wird.

Die endgültige Struktur der Datenerhebung und -aufbereitung richtet sich schließlich am dritten Punkt, den Erfordernissen der Methode der Investitionsrechnung, die in das angestrebte Modell integriert wird, aus.

Vor der Wahl einer Methode sind jedoch zwei grundsätzliche Mängel der Investitionsrechnung zumindest zu benennen. Zum einen handelt es sich um das Problem der Datenbeschaffung und zum anderen um das Problem der Vereinfachung der Realität in mathematischen Modellen. [126, S. 34]

Diese beiden Probleme schlagen sich in einem Spannungsverhältnis zwischen „theoretischer Exaktheit“ in der Widerspiegelung der Realität und der Anwendbarkeit einer Methode nieder. Perridon und Steiner bemerken hierzu: „Je exakter ein Verfahren vom theoretischen Standpunkt aus ist, desto schwieriger erweist sich im allgemeinen seine Realisierung in der Praxis.“ [124, S. 38]

Dieses Dilemma vor Augen werden nichtsdestotrotz im Folgenden, auf dem Bild einer Investitionsentscheidung sowie der Investitionsrechnung aufbauend, das Umfeld der weiteren Modellannahmen beschrieben, eine konkrete Methode ausgewählt, diskutiert und

letztlich in die Modellierung eingebettet.

### 2.2.3. Operationalisierung der Investitionsrechnung

Wie bereits angedeutet, stellt sich das gesamte Problem der ZBS-Ausrüstungsentscheidungen als Frage nach relativer Vorteilhaftigkeit dar. Es dreht sich somit um eine Wahlentscheidung, die zwischen sich ausschließenden Alternativen von Systempaketen zu fällen ist.

Damit kann das Entscheidungsproblem eindeutig gegen Ersatz- oder Nutzungsdauerentscheidungen abgegrenzt werden. Zum einen, da die Nutzungsdauer modellexogen für alle Investitionsalternativen definiert wird, zum anderen, da die Entscheidungen über Ersatzzeitpunkte im Modell durch die explizite Betrachtung der Anregungen (Kapitel 2.2.2) exogen für den Investitionsprozess fallen.

Weiterhin hat die bisherige Diskussion der Investitionsrechnung den möglichen Zielkanon auf ein eindimensionales, quantitatives, monetäres Ziel eingeengt und somit nicht-monetäre Größen, Imponderabilien, von der Betrachtung ausgeschlossen.

Außerdem ist anzumerken, dass es sich bei der bisherigen und auch weiter verfolgten Abbildung um ein deterministisches Modell handelt, so dass auch für den Bereich der Investitionsrechnung die Annahme von Sicherheit für alle relevanten Größen aufrecht erhalten werden kann.

In einer weiteren Annahme wird als Rahmenbedingung für die Investitionsentscheidungen ein vollkommener, unbeschränkter Kapitalmarkt vorausgesetzt. Diese Annahme betrifft den Kapitalmarkt, auf dem parallel zur eigentlichen Investition die überschüssigen Einzahlungen und Auszahlungen der Investitionsalternativen als Finanzinvestition angelegt bzw. als Finanzierung aufgenommen werden.

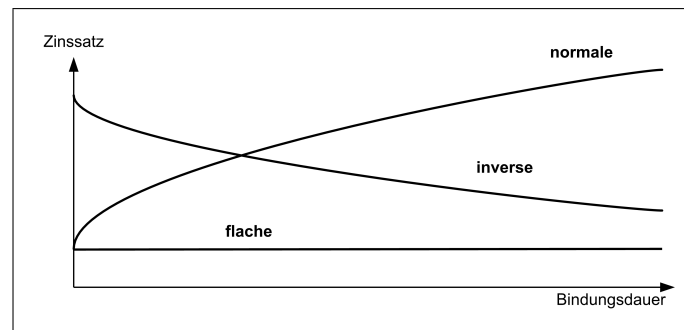


Abbildung 2.12.: Idealisierte Zinsstrukturkurven

Mit der Annahme der Vollkommenheit des Kapitalmarktes wird vorausgesetzt, dass der Zinssatz, zu dem Geld angelegt werden kann, gleich dem Zinssatz ist, zu dem Geld aufgenommen werden kann, so dass der Haben- gleich dem Sollzinssatz ist. Daneben besagt die Unbeschränktheit, dass es kein Limit hinsichtlich der Menge an Geld gibt, das am Kapitalmarkt aufgenommen bzw. angelegt werden kann.

Diese Annahme eines vollkommenen, unbeschränkten Kapitalmarktes wird zusätzlich durch die Annahme einer flachen Zinsstrukturkurve flankiert. In Zinsstrukturkurven wer-

den die Zinssätze über die Laufzeit der zugrunde liegenden Finanzinstrumente abgetragen, wobei Abbildung 2.12 exemplarisch eine normale, eine inverse sowie eine flache Zinsstrukturkurve darstellt. Mit einer flachen Zinsstrukturkurve wird somit ein einheitlicher Marktzins, unabhängig von der Laufzeit der Finanzinstrumente, vorausgesetzt.

Durch die beschriebene Vollkommenheit des Kapitalmarktes und die flache Zinsstrukturkurve kann die eigentliche Investitionsentscheidung von der Finanzierungsentscheidung getrennt werden [81, S. 36]. Neben diesem Phänomen führt der vollkommene Kapitalmarkt mit einem einheitlichen Marktzins dazu, dass die Investitionsentscheidung unabhängig von der Konsumpräferenz des Investors betrachtet werden kann, was im Theorem der „Fisher-Separation“ zum Ausdruck kommt. [91, S. 92]

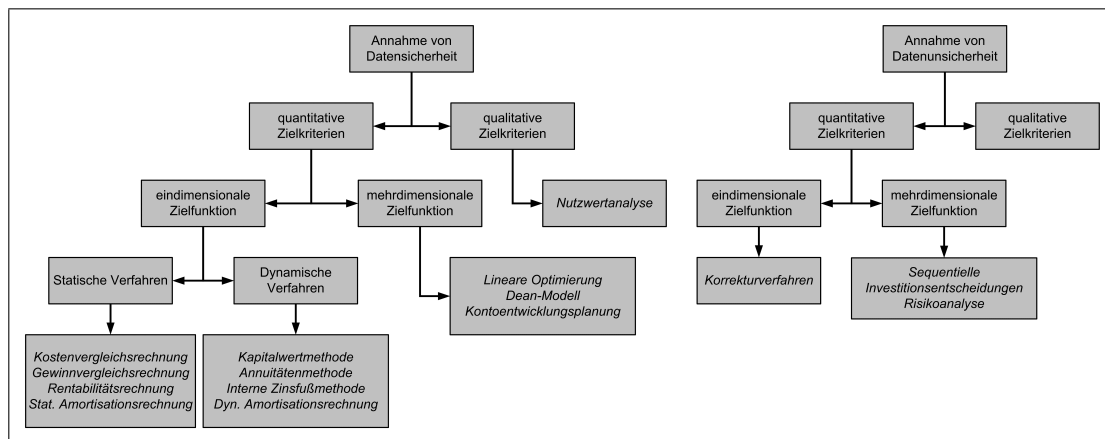


Abbildung 2.13.: Taxonomie der Investitionsrechnungsverfahren (Quelle: vgl. [126, S. 17f.] )

Entlang der Gesamtheit der soeben beschriebenen Annahmen kann der Alternativenraum der für die Auswahl einer Investitionsrechnungsmethode zur Verfügung stehenden Verfahren auf die statischen und dynamischen Verfahren eingegrenzt werden. Dabei können einzelne Verfahren, eine Klassifikation von Poggensee nutzend, die in der Abbildung 2.13 dargestellt ist, aufgrund folgender Annahmen unberücksichtigt bleiben.

Wie bereits angedeutet, werden Methoden für Ersatz- oder Nutzungsdauerentscheidungen von vornherein ausgeschlossen, da es sich um eine Wahlentscheidung handelt.

Durch die Annahme von Sicherheit bei allen Modellgrößen scheiden Verfahren, wie die sequentielle Investitionsentscheidung, die Risikoanalyse oder die Korrekturverfahren, die explizit Unsicherheit berücksichtigen, aus der Menge der Alternativen aus.

Mit der Beschränkung der Zielgröße auf rein quantitative, monetäre Größen kann die Nutzwertanalyse ausgeschlossen werden.

Die weitere Beschränkung auf eine eindimensionale Zielgröße schließt zum Beispiel die lineare Optimierung, das Dean-Modell oder die Kontoentwicklungsplanung aus.

Letztlich können Methoden der simultanen Investitions- und Finanzierungs- oder Produktionsplanung sowie die Methode der vollständigen Finanzpläne unberücksichtigt bleiben, da sie entweder einen mehrdimensionalen Zielraum verfolgen oder Gegebenheiten eines unvollkommenen Kapitalmarktes berücksichtigen. [126, S. 17f.]

Damit stehen, wie angedeutet, für die Auswahl einer Methode im Weiteren nur die statischen und dynamischen Investitionsrechnungsverfahren zur Verfügung.

Zu den *statischen Investitionsrechnungsverfahren* zählen die Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsrechnung und die statische Amortisationsrechnung.

Für die ersten drei Verfahren kann festgehalten werden, dass sie die „zeitliche Struktur der Ein- und Auszahlungen“ nicht berücksichtigen [91, S. 42]. Gerade vor dem Hintergrund der langen Nutzungsdauern im System Eisenbahn, der Bundesverkehrswegeplan zum Beispiel setzt eine Nutzungsdauer von 20 Jahren für Signalanlagen an [21, S. 98], ist diese Vereinfachung jedoch von vornherein abzulehnen.

Die statische Amortisationsrechnung bestimmt für eine Investition eine kritische Nutzungsdauer, die realisiert werden sollte, damit diese für den Investor absolut vorteilhaft wird, und berücksichtigt somit gewissermaßen die zeitliche Struktur der Zahlungsströme [91, S. 41]. Jedoch bezieht diese Methode lediglich die Zahlungsströme bis zur Amortisation ein, „der Zeitraum nach der Amortisation wird [...] nicht berücksichtigt.“ [124, S. 56]

Damit scheidet auch die statische Amortisationsrechnung für die Wahl einer Investitionsrechnungsmethode aus, denn das Kriterium der Amortisationszeit ist kein eindeutiger Hinweis auf eine relative Vorteilhaftigkeit einer Investitionsalternative über den gesamten Investitionshorizont. Zusätzlich entsteht das Problem, dass in der statischen Amortisationsrechnung die Möglichkeit angelegt ist, in der Berechnung zu keinem eindeutigen Ergebnis zu führen. Dieser Fall ist zum Beispiel gegeben, wenn über die relative Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen entschieden werden soll, die keine absolute Vorteilhaftigkeit aufweisen.

Folglich bilden die *dynamischen Investitionsrechnungsverfahren* die Menge an Alternativen, die für die weitere Operationalisierung der Investitionsrechnung in der angestrebten Modellierung zur Verfügung stehen.

Die allgemeinen Annahmen, die den dynamischen Investitionsrechnungsmethoden zugrunde liegen, fasst Poggensee in folgenden Punkten zusammen:

- „alle Rechenelemente sind mit Sicherheit bekannt,
- alle Rechenelemente fallen nachschüssig an,
- Zahlungen sind über die Zeit verschiebbar,
- es gibt nur einen Zinssatz,
- als Rechenelemente werden nur Zahlungen beachtet und
- die Annahme von Gewinnmaximierung [...]“ [126, S. 110]

Mit Berücksichtigung der Nachschüssigkeit aller Zahlungen, sowie der Verschiebbarkeit der Zahlungen, die auf der Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes beruht, erfüllen die Annahmen der Modellierung der vorliegenden Arbeit die „sechs Annahmen [...] für die Funktionsfähigkeit der dynamischen Investitionsrechnungsverfahren“ [126, S. 110]. Da die dynamischen Verfahren weiterhin explizit die zeitliche Struktur von Zahlungsströmen, durch die Auf- oder Abzinsung dieser auf gemeinsame Vergleichszeitpunkte, erfassen, können diese im Weiteren zur Anwendung kommen. [91, S. 46]

Der vorweg eingeführten Einteilung der Struktur der Zahlungsströme als Zielgröße in Vermögens-, Entnahme- und Renditekonzepte folgend, können die Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung in Endwert-, Entnahme- und Renditemodelle differenziert werden.

Dabei unterscheiden sich die Endwert- und die Entnahmemodelle hinsichtlich der Zeitstruktur der Zahlungsströme, die der Investor bestrebt ist zu maximieren. In den Endwertmodellen, wird angenommen, dass ein Investor bestrebt ist, den Wert seines Endvermögens zu maximieren, wohingegen die Entnahmemodelle von einer Maximierung periodisch, gleichförmiger Entnahmen ausgehen. Die Renditemodelle setzen als Annahme, dass ein Investor das Verhältnis zwischen Gewinn und eingesetztem Kapital maximiert. [91, S. 13]

Als konkrete Methoden der angeschnittenen Konzepte können als Endwertmodell die Kapitalwertmethode, als Entnahmmodell die Annuitätenmethode und als Renditemodell die Methode des Internen Zinsfußes angeführt werden. Parallel zur statischen Amortisationsrechnung ist als weitere konkrete Methode die dynamische Amortisationsrechnung zu betrachten.

Die dynamische Amortisationsrechnung setzt dabei auf den Endwert- und Entnahmmodellen auf und bestimmt als „endogene, abhängige Variable“ die Nutzungsdauer, bei der der „Zielwert“ der jeweiligen Verfahren null wird. [126, S. 166]

Von einer Wahl als Investitionsrechnungsmethode für die weitere Modellierung kann die dynamische Amortisationsrechnung mit einer analogen Argumentation, wie bei ihrem statischen Pendant, ausgeschlossen werden. Zum einen ist die Amortisationsdauer kein direkter Hinweis auf relative Vorteilhaftigkeit und zum anderen sind Konstellationen der Investitionsalternativen möglich, bei denen diese Methode zu keinem eindeutigen Ergebnis führt.

Analog zur dynamischen Amortisationsrechnung wird auch bei der Methode des Internen Zinsfußes verfahren. Statt der Nutzungsdauer wird hier jedoch der Zinssatz als „endogene, also abhängige Variable“ variiert, bis der Zielwert der zugrunde gelegten Methode, die Kapitalwert- oder die Annuitätenmethode, null ist. [126, S. 154]

Im Gegensatz zur Amortisationsrechnung kann der Interne Zinsfuß als alleiniges Kriterium für die Beurteilung der relativen Vorteilhaftigkeit von Investitionsalternativen herangezogen werden. Problematisch erscheint diese Methode jedoch hinsichtlich des möglichen Lösungsraums.

Mathematisch stellt sich diese Methode als eine „Lösung einer [...] Polynomgleichung T-ten Grades“ dar [91, S. 111]. Damit ist es prinzipiell möglich, dass es neben eindeutigen auch mehrdeutige oder gar keine Lösungen geben kann. Aus diesem Blickwinkel steht diese Methode einer sinnvollen Operationalisierung der Investitionsrechnung entgegen.

Zusätzlich muss hervorgehoben werden, dass die Fälle, die zu keiner Lösung im Sinne der Methode des Internen Zinsfußes führen würden, bei denen also eine absolute Vorteilhaftigkeit für keine Investitionsalternative erreicht wird, durchaus plausible Szenarien im Zusammenhang mit Zugbeeinflussungssystemen darstellen und somit nicht von vornherein ausgeschlossen werden können.

Somit verbleiben die Kapitalwertmethode und die Annuitätenmethode als Alternativen der dynamischen Investitionsrechnung für die Auswahl einer Methode.

Unter der Voraussetzung einer gleichen Nutzungsdauer aller Investitionsalternativen sowie des unbeschränkten, vollkommenen Kapitalmarktes, der die Unabhängigkeit zwischen den Konsumpräferenzen des Investors und der eigentlichen Investitionsentscheidung nach sich zieht, kann gezeigt werden, dass „die Annuitätenmethode [...] mit der Kapitalwertmethode vollkommen äquivalent“ ist. [91, S. 111]

Um schließlich eine Auswahl zwischen den beiden, im gegebenen Modellrahmen äquivalenten Methoden, zu treffen, wird die weite Verbreitung der Kapitalwertmethode in der Praxis [109, S. 232], insbesondere auch in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen des Verkehrswesens, siehe zum Beispiel [24] oder [146, S. 112], zugrunde gelegt. Somit wird für die weitere Operationalisierung der Investitionsrechnung als Kern des Investitionsprozesses die Kapitalwertmethode genutzt.

### Die Kapitalwertmethode als Kernelement der Modellierung

Mit der Kapitalwertmethode wird in Form des Kapitalwertes ein Zielwert generiert, der den Wert einer Investition in der Gegenwart widerspiegelt. In diesem Kennwert werden alle Informationen einer Investition, die in Form von Zahlungsreihen vorliegen, auf einen Zeitpunkt konzentriert. [126, S. 124]

Als Definition für die weitere Anwendung der Methode soll Kruschwitz gefolgt werden. Er definiert den Kapitalwert einer „Investition [als] die Summe aller mit dem Kalkulationszinssatz auf den Zeitpunkt  $t = 0$  diskontierten Investitionszahlungen.“ [91, S. 111]

Diese Definition kommt auch in der Gleichung 2.4 zum Ausdruck, die an Poggensee ([126, S. 131]) angelehnt ist. Weiterhin versucht die Abbildung 2.14 einen Eindruck der Diskontierung der Zahlungen auf den Zeitpunkt  $t = 0$  durch den Diskontfaktor  $q_t$  zu vermitteln.

«Kapitalwertformel»	$KW = \sum_{t=0}^n \frac{(e_t - a_t)}{(1+i)^t} + \frac{R}{(1+i)^n} \quad (2.4)$
«Kapitalwert [GE]»	$KW$
«Zeitperioden von $t = 0$ bis $n$ »	$t$
«Einzahlungen der Periode $t$ [GE]»	$e_t$
«Auszahlungen der Periode $t$ [GE]»	$a_t$
«Restwert [GE]»	$R$
«Kalkulationszinssatz [%]»	$i$

Die Gleichung 2.4 verdeutlicht außerdem, dass im Kapitalwert die Differenzen der Barwerte der Einzahlungen  $e_t$  und der Auszahlungen  $a_t$ , die mit einer Investition verbunden sind, summiert werden. [109, S. 232]

Zusätzlich wird mit der Größe  $R$  der Restwert der Investition am Ende des Investitionshorizonts  $t = n$  ebenfalls als Barwert in die Summe integriert. Dabei kann der Restwert einer Investition sowohl positiv als auch negativ sein. Ein negativer Restwert kann als Auszahlung für die endgültige Entsorgung der Investition interpretiert werden.

Aus der Reihe der Auszahlungen tritt die Auszahlung  $a_0$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  als die Anschaffungsauszahlung einer Investition hervor.

Die Barwerte der Zahlungsströme werden mittels des Diskontfaktors  $q_t = (1 + i)^{-t}$  auf den Zeitpunkt  $t = 0$  bezogen. Der Zeitpunkt  $t = 0$  symbolisiert den Zeitpunkt der Realisation der Investition, wohingegen der Zeitpunkt  $t = n$  das Ende der Investition darstellt. Die Zeitspanne zwischen diesen Zeitpunkten bildet den Investitionshorizont bzw. die Nutzungsdauer der Investition.

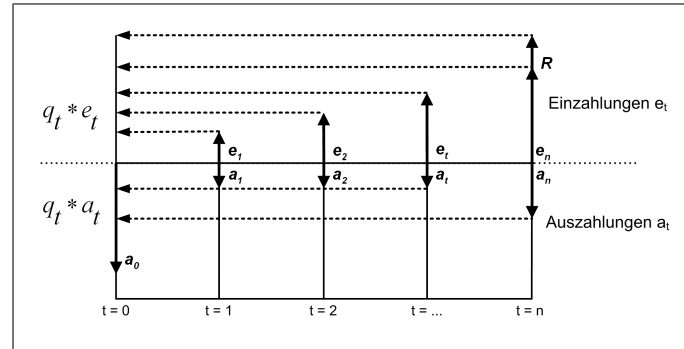


Abbildung 2.14.: Diskontierung fiktiver Zahlungsströme einer Investition

Der Kalkulationszinssatz  $i$  ist innerhalb des Kapitalwertes ein „Maßstab der Verzinsung des gebundenen Kapitals“. Das bedeutet, dass der Kapitalwert einer Investition eine Vergleichsgröße zu einer fiktiven Investition darstellt, die sich genau mit dem Kalkulationszinssatz verzinst. [124, S.61]

Im Kalkulationszinssatz  $i$  kommt aber auch die zentrale Prämisse des Kapitalwertes, der vollkommene, unbeschränkte Kapitalmarkt, zum Tragen. Denn zum Kalkulationszinssatz, der den einheitlichen Zinssatz auf einem vollkommenen Kapitalmarkt repräsentiert, kann beliebig Geld aufgenommen und investiert werden. [129, S.68]

Damit stellt der Kalkulationszinssatz  $i$  den „für den vollkommenen Kapitalmarkt charakteristischen, einheitlichen Zinssatz“ dar, zu dem ein Investor die „Ergänzungs-Investitionen und -Finanzierungen“ zu seiner Investition vornimmt. [91, S. 66]

Da diese Ergänzungsinvestitionen und -finanzierungen zum Kalkulationszinssatz getätigt werden, haben sie als Investitionen einen Kapitalwert von „null“ und beeinflussen den Kapitalwert der eigentlichen Investition nicht. Daraus resultiert letztlich, dass „die Vorteilhaftigkeit einer Investition [...] nicht von der Art der Finanzierung [abhängt]“ und somit eine simultane Betrachtung der Finanzierung unnötig ist. [81, S. 36]

Für die Beurteilung von Investitionen kann die Vorteilhaftigkeit, die bereits allgemein abgegrenzt wurde, nun anhand des Kapitalwertes konkret definiert werden. Müller definiert hierfür die absolute Vorteilhaftigkeit einer Investition, „wenn der Kapitalwert nicht negativ ist [...]“, wenn also gilt  $KW \geq 0$ . [109, S. 234]

Für eine relative Vorteilhaftigkeit, die einen Vergleich zwischen mehreren sich ausschließenden Investitionen darstellt, definiert Hering folgendes Entscheidungskriterium: „Von mehreren sich gegenseitig ausschließenden Objekten ist dasjenige vorteilhaft, welches den größten nichtnegativen Kapitalwert [...] aufweist.“ [81, S. 48]



In der weiteren Modellierung bildet diese Definition die Grundlage für die im Investitionsprozess nachfolgenden Phasen der „Rangfolgebildung“ und der „Auswahl“ bzw. „Entscheidung“. Die Rangfolge der Investitionsalternativen wird entlang der Größe ihrer Kapitalwerte gebildet und schließlich die Alternative ausgewählt, die den größten Kapitalwert aufweist.

Jedoch ist herauszustreichen, wie ebenfalls bereits angedeutet, dass für die Modellierung, abweichend von der Definition der relativen Vorteilhaftigkeit, keine absolute Vorteilhaftigkeit vorausgesetzt wird. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass prinzipiell in Zugbeeinflussungssystemen Systeme gesehen werden können, die keinerlei Einzahlungen generieren, jedoch zwingend vorgeschrieben sind, was letztlich auf einen negativen Kapitalwert hinausläuft. Um solche Annahmen in der Modellierung zu erfassen und trotzdem Aussagen machen zu können, wird auf das Kriterium der absoluten Vorteilhaftigkeit verzichtet.

An der grundsätzlichen Eignung des Kapitalwertes als Kriterium für relative Vorteilhaftigkeitsentscheidungen ist eine breite Kritik geäußert worden, siehe z.B. Poggensee [126, S. 180ff.]. Diese Kritik stellt zumeist auf die Unvergleichbarkeit von Investitionsalternativen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern und/oder Zahlungsreihen ab. [124, S. 70]

Neben dem Vorliegen einer einheitlichen Nutzungsdauer aller Investitionsalternativen im Modell ist die Kritik der Unvergleichbarkeit von verschiedenen Zahlungsreihen, Hering folgend, für die Modellierung und im Allgemeinen zurückzuweisen. Ausgehend von der Gegenüberstellung „kompletter Aktionsbündel“ werden unterschiedliche Zahlungsreihen durch den vollkommenen Kapitalmarkt kapitalwertneutral ausgeglichen, so dass die Investitionsalternativen durchaus miteinander vergleichbar sind. [81, S. 48ff.]

Demzufolge wird für die weitere Modellierung an der Kapitalwertmethode als zentrale Investitionsrechnungsmethode festgehalten. Die damit einhergehenden Annahmen fasst die folgende Übersicht zusammen:

- vollkommener, unbeschränkter Kapitalmarkt,
- flache Zinsstrukturkurve,
- Sicherheit aller Größen,
- Nachschüssigkeit der Zahlungsströme,
- vollständige, sich gegenseitig ausschließende Investitionsalternativen,
- gleiche Nutzungsdauer der betrachteten Investitionsalternativen sowie
- Streben nach Maximierung des Zahlungsstroms als eindimensionale Zielfunktion des Investors.

Für die weitere Modellierung liegt somit die Aufgabe darin, die zentralen Größen des Kapitalwertes im Sinne des angestrebten Modells zu operationalisieren, die herausgearbeiteten Determinanten des Adoptionsprozesses (Tabelle 2.2 auf der Seite 17) zu integrieren und eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus von Zugbeeinflussungssystemen zu modellieren.

Insbesondere der Aspekt der Netzeffekte, also die Wirkung der Verbreitung von komplementärer und kompatibler Systemtechnik auf den jeweiligen Nutzen, schlägt sich in der Modellierung der Einzahlung nieder. Auf der anderen Seite muss die Variation der Auszahlungen eines ZBS über den gesamten Lebenszyklus in die Modellierung einfließen.

Die explizite Entwicklung der beiden Zahlungsströme wird im Kapitel 3.4 für die Gegebenheiten des Eisenbahnsystems und der Zugbeeinflussungssysteme dargestellt.

Neben den Zahlungsströmen haben die Nutzungsdauer und der Kalkulationszinssatz einen erheblichen Einfluss auf die Berechnung des Kapitalwertes der betrachteten Investitionen. Da die Nutzungsdauer der Zugbeeinflussungssysteme per Annahme zum einen als modellexogene Variable vorgegeben und zum anderen für alle Investitionsalternativen einheitlich angenommen wird, bleibt im Folgenden der Kalkulationszinssatz zu beleuchten.

Für die Betrachtung dieses Kalkulationszinssatzes sind eingangs die Annahmen, die den Zinssatz direkt betreffen, nochmals in Erinnerung zu rufen. Die Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes führt zu einem einheitlichen Soll- und Habenzins. Zusätzlich resultiert aus der Annahme einer flachen Zinsstrukturkurve eine Unabhängigkeit des Zinssatzes von der Laufzeit der zugrunde liegenden Finanzinstrumente.

Durch diese Annahmen kann, wie bereits mehrfach angeschnitten, die Beurteilung einer Investitionsentscheidung von der Finanzierungsentscheidung getrennt werden. [81, S. 48ff.]

Bei der Wahl eines Kalkulationszinssatzes für die Anwendung der Kapitalwertmethode müssen diese Annahmen sowie die Separation der beiden Entscheidungsräume einbezogen werden. Außerdem ist von vornherein zu berücksichtigen, dass „der“ Kalkulationszinsfuß nicht existiert“. [124, S. 89]

In der Literatur ist eine Reihe von Vorschlägen gemacht worden, welche Zinssätze als Kalkulationszinssatz heranzuziehen sind. Je nachdem, welche Maßstäbe genutzt oder welche Ziele verfolgt werden, ergeben sich plausible Argumentationen in die eine oder andere Richtung.

Brandt zum Beispiel schlägt drei Ansätze für die Wahl eines Zinssatzes vor: den „Kapitalzins“, der die Kapitalkosten für Fremd- und die kalkulatorischen Kosten für Eigenkapital einbezieht, den „Normalzins“, der sich an der Verzinsung von Kapital unter objektiven Marktverhältnissen ausrichtet, oder den „Ausnahmezins“, der besondere Risikoeffekte im Zinssatz berücksichtigt. [15, S. 146]

Damit wird der Kalkulationszinssatz entweder nach Aspekten der Finanzierung der Investition, nach Marktvorgaben für alternative Investitionen oder entlang der Berücksichtigung des Risikos gewählt. Weitere Vorschläge orientieren sich zum Beispiel an einer langfristigen Durchschnittsrentabilität oder dem Internen Zinsfuß der zweitbesten Investition bei einer Wahlentscheidung. [124, S. 88]

Die Anwendung des Internen Zinsfußes der zweitbesten Investitionsalternative, vorgeschlagen zum Beispiel von Hax, ist lediglich theoretisch als möglicher Ansatz zu werten. Denn hierbei wird für die Berechnung ein Ergebnis vorausgesetzt, das erst nach der Berechnung bekannt ist. Damit scheidet auch dieser Ansatz aus. [124, S. 88]

Ohne diese Diskussion weiterführen zu wollen, wird für die konkrete Festlegung eines Kalkulationszinssatzes in dieser Arbeit ein Zinskorridor zwischen drei und neun Prozent

vorgeschlagen. Dabei werden die beiden Grenzen durch zwei Sichtweisen geprägt.

Zum einen folgt die Annahme von drei Prozent der langfristig zu erwartenden Produktivitätssteigerung und damit im Ansatz dem Bundesverkehrswegeplan 2003 [21, S. 35]. In der unteren Korridorgrenze wird somit dem Bild einer Mindestverzinsung gefolgt.

Der Ansatz von neun Prozent zum anderen geht auf die Sichtweise von privaten, kapitalmarktorientierten Investoren [12, S. 234f.] bzw. die Rendite des eingesetzten Kapitals (Return on Capital Employed - ROCE) der Deutschen Bahn AG (Geschäftsbericht des DB-Konzerns 2007 [38, S. 85]) zurück. Damit wird in der oberen Korridorgrenze dem Bild einer marktkonformen Verzinsung einer Investition gefolgt.

Der Ausrichtung der Wahl eines Zinssatzes an der Finanzierungsstruktur und dem Risiko wird aufgrund der Annahmen von Sicherheit und der Trennung von Finanz- und Investitionsentscheidung nicht gefolgt. Weiterhin ist die pauschale Berücksichtigung von Risiko in der singulären Größe des Kalkulationszinssatzes abzulehnen. [124, S. 89]

Dass ein Korridor zwischen drei und neun Prozent für den Kalkulationszinssatz in der Praxis Relevanz besitzt, zeigt ein Beispiel der Schweizerischen Bundesbahnen SBB, die bei Lebenszyklusbetrachtungen hinsichtlich der Schieneninfrastruktur einen Zinssatz von fünf Prozent ansetzen [142, S. 39]. Ein weiteres Beispiel lässt sich aus Nettoanfangsrenditen des deutschen Immobilienmarkts ableiten, die Herzog „als Kalkulationszinssatz zur Ermittlung der Lebenszykluskosten“ von Baukonstruktionen nutzt und die im Zeitraum zwischen 1991 und 2000 zwischen vier und sechs Prozent lagen. [82, S. 246f.]

Letztendlich muss für die Verwendung des Modells ein Kalkulationszinssatz gewählt werden, der die Gegebenheiten der jeweiligen betrachteten Situation widerspiegelt. Dabei sollte aber beachtet werden, dass hohe Zinssätze Investitionen, bei denen hohen Anschaffungsauszahlungen erst späte Einzahlungen gegenüberstehen, tendenziell benachteiligen, so dass abschließend für einen moderaten Zinssatz von um die vier Prozent plädiert wird.

Bevor im nächsten Kapitel ein Modellbild des Bahnsystems entwickelt wird und die eben dargestellten, theoretischen Grundlagen der Modellierung auf diese spezifischen Gegebenheiten übertragen werden, folgt im weiteren Verlauf eine kurze Diskussion der Untersuchungsmethodiken, die bei der Erstellung der Prognosen zur Anwendung kommen.

## 2.3. Simulation als Prognosemethodik

In dieser Diskussion wird versucht, aufbauend auf der Klassifikation der möglichen Vorgehensweisen, einen Modellbegriff herauszuarbeiten und eine Prognosemethodik auszuwählen. Ausgehend von der benutzten Methodik muss schließlich eine konkrete Basis für die Umsetzung gefunden werden.

### 2.3.1. Taxonomie der Prognosemethodiken

Ausgangspunkt bleibt das zuvor identifizierte Ziel der Arbeit, eine Prognose über den Verlauf der Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen zu entwickeln. Der Unterteilung von Meffert folgend, kann die angestrebte Prognose vorerst als reine Entwicklungsprognose bezeichnet werden. [104, S. 36]

Hinsichtlich der Taxonomie der Prognosemethoden hat sich in der Literatur eine Vielfalt etabliert, die je nach Blickwinkel und Untersuchungsgegenstand variiert. Einheitlich hat sich lediglich eine erste Unterscheidungsebene in quantitative und qualitative Methoden durchgesetzt. Abbildung 2.15 zeigt ein mögliches Ordnungsschema, dem im Weiteren gefolgt wird.

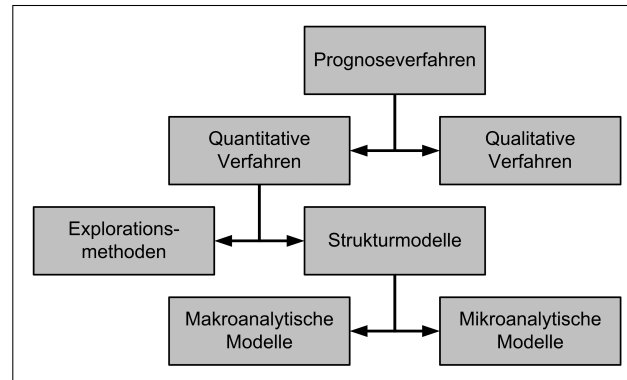


Abbildung 2.15.: Taxonomie der Prognosemethodiken (Quelle: vgl. [139, S. 155])

Frerichs und Kübler beschreiben hierzu die Gruppe der qualitativen Methoden als intuitiv-kreativ und die quantitativen Methoden als analytisch [69, S. 3]. Eine ähnliche Unterscheidung trifft Schwarzbauer in Anlehnung an Hammann und Erichson, indem er quantitative Methoden als formal und modellgestützt klassifiziert und damit im Gegensatz die qualitativen Methoden als informell eingrenzt. [139, S. 155]

Neben dem Ziel der Modellierung, quantitative (Prognose-)Aussagen zu generieren, ist das Vorgehen durch die Verwendung eines formalisierten Modells für die Prognose im Rahmen der Arbeit nach dieser Taxonomie ebenfalls als quantitativ einzustufen.

Auf der Ebene der quantitativen Methoden lassen sich, wiederum Schwarzbauer folgend, Extrapolationsmethoden und Strukturmodelle verorten. In diesem Verständnis basieren „Extrapolationsmethoden [...] ausschließlich auf der Analyse einer Zeitreihe der Prognosevariablen, während Strukturmodelle bzw. komplexe Modelle auch Einflussgrößen auf die Prognosevariablen berücksichtigen.“ [139, S. 155]

In der Auswahl einer Methode wird der Auffassung von Graf gefolgt, dass für langfristige Prognosen, und als solche ist die Untersuchung der Lebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen zu charakterisieren, „kausaltheoretisch fundierte Ansätze zur Anwendung gelangen müssen“. [72, S. 119]

Als kausaltheoretisch sind dabei Ansätze zu bezeichnen, die nicht ausschließlich auf der Zeit als Erklärungsvariable aufsetzen, sondern die die zu schätzenden Größen zu realen Faktoren in Beziehung bringen und hieraus Erkenntnisse generieren [72, S. 264]. Damit ist das angestrebte Modell dieser Arbeit auf der Seite der Strukturmodelle anzusiedeln.

Der Ausschluss der Extrapolationsmethoden kann unterdessen auch mit dem bereits angesprochenen, fast vollständigen Fehlen von empirischen Daten begründet werden.

Unter Zugrundelegung dieser Begründung scheiden auch Methoden aus, die zwar teilweise kausaltheoretisch fundiert sind, aber dennoch zum größten Teil auf der Analyse

von Vergangenheitsdaten bzw. Zeitreihen aufsetzen. Diese Methoden nehmen, wie das vorangegangene Kapitel mit Bezug auf das PLZ-Konzept gezeigt hat, zumeist einen makroanalytischen Blickwinkel ein.

Diese Unterscheidung anhand des Aggregationsgrades benutzt auch Schwarzbauer, um die Gruppe der Strukturmodelle schließlich in mikro- und makroanalytische Modelle zu unterteilen. [139, S. 155]

Dieser Taxonomie der Prognosemethoden folgend, kann die für die weitere Modellierung genutzte Methode als quantitativ und auf die Erstellung eines mikroanalytischen Strukturmodells ausgerichtet bezeichnet werden. Damit decken sich die Überlegungen hinsichtlich der angestrebten Prognosemethodik sowie der im vorigen Kapitel entwickelten theoretischen Fundierung.

### 2.3.2. Skizze eines Modellbegriffs

Das angestrebte Modell ist je nach Blickwinkel als Prognosemodell (Art der Verwendung), als dynamisch, diskret und deterministisch (Art der Zustandsänderungen) oder als immateriell, formal-mathematisch (Art der Abbildung) zu klassifizieren.

Allgemein sollen für die Arbeit unter Modellen, Niemeyer folgend, „materielle oder immaterielle Systeme [verstanden werden], die andere Systeme so darstellen, dass eine experimentelle Manipulation der abgebildeten Strukturen und Zustände möglich ist.“ [111, S. 57]

In dieser Definition kommt die Auffassung zum Ausdruck, dass Modelle in einer Beziehung zur Realität oder zu realen Systemen stehen und auf einen Anwendungszweck hin konstruiert werden, der letztlich wieder auf das Ausgangssystem gerichtet ist. Somit abstrahieren Modelle von der Wirklichkeit und reduzieren diese auf die für den Modellzweck relevanten Zusammenhänge.

Für die Beurteilung der Modellgüte steht somit neben der zumindest homomorphen, also strukturerhaltenden Abbildung der Realität auch die Erfüllung des Anwendungszwecks des Modells im Fokus.

Bezogen auf das hier angestrebte Prognosemodell bedeutet dies, dass die abschließende Beurteilung erst am Ende des Prognosehorizonts mit dem Vergleich der prognostizierten und der erhobenen empirischen Daten der jeweiligen realen Situation vorgenommen werden kann. Dabei bildet diese „prognostische Gültigkeitsprüfung“ [121, S. 154] jedoch lediglich den Schlussstein einer Validierungskette.

Diese abschließende Beurteilung der Modellgüte ist definitorisch als „empirische[r] Test“ anzusehen, wobei das „Vorgehen [...] jedoch dem einer Validierung bzw. Falsifizierung von Theorien anhand empirischer Daten“ entspricht. [110, S. 21]

Die gesamte Validierungskette, die auch in der hier beschriebenen Modellierung durchlaufen wird und die sich durch den gesamten Entwicklungsprozess zieht, soll im Folgenden kurz an den jeweils erreichten Abbildungsebenen skizziert werden.

Wie Abbildung 2.16 zeigt, spannen das adressierte Realsystem, das theoretische Modell sowie schließlich das lauffähige (Computer-)Modell diese Ebenen auf. Zwischen den Ebenen können die einzelnen Validierungsschritte angesiedelt werden.

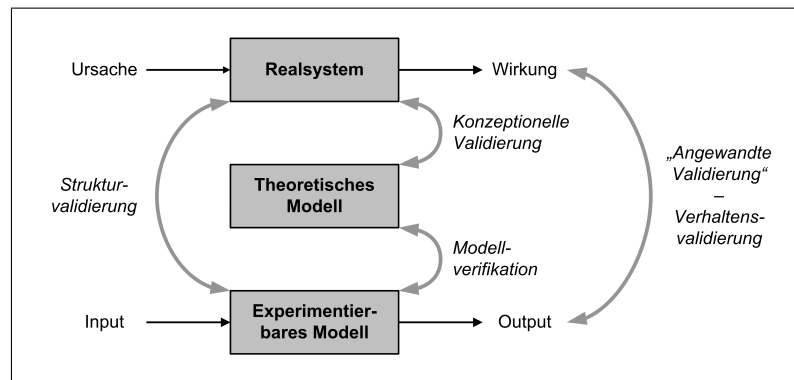


Abbildung 2.16.: Ebenen der Modellvalidierung (Quelle: vgl. [151, S. 8])

Page nennt die Überprüfung der Hypothesen und Annahmen, die Datenüberprüfung sowie die Strukturprüfung zwischen dem realen System und dem theoretischen Modell als erste Validierungsschritte [121, S. 149]. Vangheluwe fasst diesen Schritt unter „conceptual model validation“ zusammen und bezieht dabei den Modellzweck explizit mit in die Validierung ein. [151, S. 8]

Dieser Ansicht wird in der Arbeit zum überwiegenden Teil gefolgt. Wobei einschränkend jedoch zum einen die Hypothese- und Strukturprüfung als interdependent angesehen werden und zum anderen davon ausgegangen wird, dass mit zunehmender Komplexität der realen Ausgangssysteme und damit einhergehend der Modellierung die einfache Strukturprüfung zugunsten einer Wirkungs- oder Wirkstrukturprüfung anhand des lauffähigen Modells zurücktritt.

Die Verifikation zwischen dem theoretischen und dem lauffähigen Modell, die die korrekte Umsetzung der konzeptionellen Idee in ein Computermode sicherstellt, begleitet die gesamte Operationalisierung des theoretischen Modells. [151, S. 7]

Mit Hilfe des lauffähigen Modells kann schließlich neben der „Strukturgültigkeit“ auch die „Verhaltensgültigkeit“ ins Zentrum der Überprüfungen gerückt werden, wobei Page hier den Begriff der „angewandten Modellvalidierung“ prägt [121, S. 150]. Als Verfahren sind dafür zum Beispiel Plausibilitätstests, Sensitivitätsanalysen oder letztlich die Kontrolle der „prognostischen Gültigkeitsprüfung“ entlang der realen und prognostizierten Ergebnisse zu nennen.

Abschließend und einschränkend muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass ein Prognosemodell niemals vollständig verifiziert werden kann. Dies resultiert zum einen daraus, dass Strukturgültigkeit keine Strukturgleichheit zwischen Modell und realem System bedeutet, da die Modellbildung durch bewusste Vereinfachung auf Strukturgleichheit verzichtet und verzichten muss. Zum anderen kann der zweite Maßstab, der Verhaltensgültigkeit zwischen Modell und realem System, nicht als eindeutiger Hinweis auf die Validität eines Modells gewertet werden. Vangheluwe drückt diesen Sachverhalt wie folgt aus: „A large number of matching measurements and [...] results, though increasing confidence, does not prove validity of the model however.“ [151, S. 7]

Dennoch wird gerade mittels der Validierungskette, die den gesamten Prozess der Mo-

dellierung begleitet, versucht, Vertrauen in das Prognosemodell und dessen Ergebnisse aufzubauen. [93, S. 10]

### 2.3.3. Auswahl einer Untersuchungsmethodik

Innerhalb des Entwicklungsprozesses markiert der Übergang von einem theoretischen Modell zu einem ablauffähigen (Computer-)Modell eine Zäsur, die sowohl die letztendliche Modellform bestimmt als auch die endgültig verfolgte Untersuchungsmethodik absteckt.

Für die Umsetzung von formalen, mathematischen Modellen in lauffähige Computermodele mit den zugehörigen Analysemethoden nennt Biethahn zwei grundlegende Ansätze, zum einen die analytische und zum anderen die algorithmische Modellierung, siehe Abbildung 2.17. Die Analyse der analytischen Modelle führt schließlich zu einer analytischen Lösung, wohingegen die algorithmischen Modelle einer simulativen Analyse unterzogen werden. [9, S. 51]

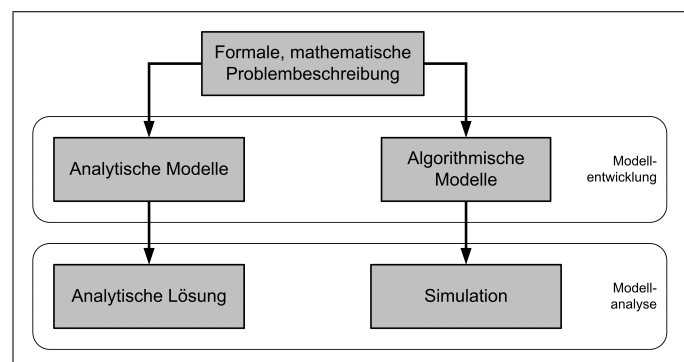


Abbildung 2.17.: Modellierung und Modellanalyse (Quelle: vgl. [9, S. 51])

Diese Unterscheidung, die den Weg der weiteren Modellierung vorzeichnet, trifft auch Page, der mathematisch, formale Modelle ebenfalls entweder in analytische Modelle oder in Simulationsmodelle unterteilt. [121, S. 5]

Dabei setzt die analytische Modellierung voraus, dass das theoretische Ausgangsmodell in seiner formalen, mathematischen Form in einem geschlossenen, endlichen Gleichungssystem dargestellt werden kann. Ist dies möglich, so erlauben analytische Modelle die Bestimmung des gesuchten Outputs in einem geschlossenen Lösungslauf. [39, S. 31f.]

Dagegen wird in einer Simulation ein iterativer Prozess durchlaufen, der den Modellzustand Schritt für Schritt manipuliert und so über Zwischenstände zum Prognosehorizont als Endpunkt strebt [121, S. 4]. Grundlage für Simulationen ist ein Simulationsmodell, das das lauffähige Computermodele des theoretischen Modells darstellt.

In der vorliegenden Arbeit wird vor diesem Hintergrund die Auffassung vertreten, dass die Modellkomplexität, geprägt durch die mikroanalytische Orientierung, durch nicht-lineare Rückkopplungsprozesse sowie durch die Interdependenz der mikro- und der makroanalytischen Ebenen, nicht in einem geschlossenen Gleichungssystem und damit in einem analytischen Modell dargestellt werden kann.

Damit wird als Untersuchungsmethodik eine Simulation angestrebt und im Weiteren ein mikroanalytisches Simulationsmodell entwickelt.

Einleitend dazu findet im Folgenden eine kurze Diskussion der Simulationsmethodik allgemein statt. Dabei steht die Auswahl einer Simulationsumgebung im Mittelpunkt. Die vorangegangenen Überlegungen zu Modellen und deren Validierung lassen sich auf Simulationsmodelle übertragen und werden somit nicht wiederholt betrachtet.

Den Einstieg bildet die Definition der VDI-Richtlinie 3633, die Simulationen als „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell [definiert], um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“ Da diese Definition auch analytische Berechnungen einschließt, grenzt die Richtlinie Simulationen weiter auf „Experimente mit einem Simulationsmodell“ ein. [154, S. 2]

Mit dieser Definition wird der gesamte Prozess der Modellbildung und -verwendung, wie er auch in dieser Arbeit durchlaufen und dargestellt wird, als Simulation eingestuft.

Für die Benutzung einer Simulation als Untersuchungsmethodik müssen die Vor- und Nachteile abgewogen werden.

Zum Beispiel nennt Biethahn den Aufwand der Modellierung und die Implementierung des Simulationsmodells sowie den Näherungscharakter der Ergebnisse als die größten Schwächen dieser Methode. Dem stehen die Möglichkeit der Abbildung, Variation und Untersuchung von zumeist sehr komplexen Systemen, die Darstellbarkeit von dynamischen Prozessen, die Antizipation von Systembeeinflussungen sowie der Erkenntnisgewinn über den gesamten Simulationsprozess hinweg gegenüber. [10, S. 14f.]

Für die Zielstellung der Arbeit, insbesondere mit Hinblick auf das komplexe System Eisenbahn, überwiegen die positiven Aspekte, so dass an der Entscheidung zugunsten der Simulationsmethodik festgehalten wird.

Wie bereits angedeutet, stellt die Implementierung des theoretischen Modells innerhalb des Simulationsprozesses einen zentralen Schritt dar. Um zu einem lauffähigen Computermodell zu gelangen, an dem schließlich die eigentlichen „Simulationsexperimente“ durchgeführt werden, muss ein „Simulator“, ein Softwareprogramm zur Implementierung des theoretischen Modells, ausgewählt werden. [154, S. 2]

Dabei ist die Wahl des Simulators an dem theoretischen Modell auszurichten, was für das vorliegende Modell der Arbeit bedeutet, dass der mikroanalytische Blickwinkel eine primäre Rolle spielt. Mit dieser mikroanalytischen Perspektive geht die Frage der Datenhaltung der einzelnen, mitunter sehr zahlreichen Objekte sowie deren indikativer und relativer Attribute einher.

Weitere Kriterien für die Auswahl des Simulators sieht Probst in der „Kapazität und Rechengeschwindigkeit“, der „Bequemlichkeit“, der „vorhandenen Hardware“ sowie den „Kosten“. [127, S. 57]

Unter dem Gesichtspunkt der „Kapazität und Rechengeschwindigkeit“ fasst Probst zum Beispiel die darstellbare Größe und Komplexität der Systeme oder die Frage nach der Dauer eines Simulationslaufes oder die Möglichkeit eines „Online-Betriebs“ zusammen. Die „Bequemlichkeit“ markiert für ihn den Aufwand der Programmerstellung, der neben den Kosten auch die Ressource „Zeit“ als Kriterium einkalkuliert. [127, S. 57]

Für die Auswahl eines Simulators werden neben den grundsätzlichen Anforderungen



des theoretischen Modells diese Kriterien mit in die Entscheidung einbezogen. Weitere Voraussetzungen sind für das konkret angestrebte Modell in den Möglichkeiten einer szenarioorientierten Organisation der Eingangsdaten, der simulationssynchronen Erfassung der Ergebnisdaten sowie der Gestaltung einer interaktiven Benutzeroberfläche zu sehen.

Die Auswahl für Simulatoren, die Probst auch als „Simulationswerkzeuge“ bezeichnet, wird in folgenden Punkten gesehen:

- „(Low-Level) Programmiersprachen“,
- „Tabellenkalkulationsprogramme“,
- „interaktive Mathematikpakete“,
- „Simulationssprachen“ sowie
- „Spezialprogramme“. [127, S. 57f.]

Durch die Ausrichtung von interaktiven Mathematikpaketen auf analytische Modellierungen scheiden diese Optionen für die Implementierung des theoretischen Modells, das nicht in einer geschlossenen analytischen Form dargestellt werden kann, aus.

Auch Spezialprogramme, die sich als Simulationsmodelle auf konkrete Anwendungsgebiete beziehen, werden nicht berücksichtigt. Eher kann das angestrebte Simulationsmodell selbst als Spezialprogramm für die Modellierung der Lebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen gesehen werden.

Ein Teil der spezialisierten Simulationssprachen, wenn sie auf makroanalytische Betrachtungen und/oder die Lösungen von Differentialgleichungen zugeschnitten sind, wie z.B. Vensim® oder Stella®, bleibt für die Implementierung ebenfalls unberücksichtigt.

Simulationssprachen, die einen mikroanalytischen Fokus haben, wie z.B. AnyLogic®, können für die Implementierung prinzipiell herangezogen werden. Dem stehen jedoch in der Realisierung die Kriterien der Kosten und die damit einhergehende Beschränkung der nutzbaren bzw. vorhandenen Hardware entgegen.

Daneben ist die Benutzung von generischen Programmiersprachen möglich, wobei jedoch berücksichtigt werden muss, dass neben dem eigentlichen Simulationsprogramm auch die Ein- und Ausgabe sowie die interne Organisation der Daten manuell umzusetzen ist. Dies ist unter dem Gesichtspunkt der „Bequemlichkeit“ hinsichtlich der nötigen Zeit für die Einarbeitung in die Sprache und die eigentliche Programmierung abzulehnen.

Als letzter Punkt stehen die Tabellenkalkulationsprogramme zur Diskussion. Hier ist zu beachten, dass diese sehr schnell an ihre Grenzen hinsichtlich der darstellbaren Komplexität und Datenmenge gelangen. [127, S. 58]

Bei einer Erweiterung des Begriffs der Tabellenkalkulationsprogramme auf Datenbanksysteme (DBS) zeigt sich jedoch, dass diese Grenzen hier nicht oder erst sehr viel später beschränkend wirksam werden.

Weiterhin ist es ohne Probleme möglich, die mikroanalytische Sichtweise mit ihren zahlreichen einzelnen Objekten und Attributen in der Tabellenstruktur eines DBS abzubilden und dynamisch zu manipulieren. Durch die Integration einer Programmiersprache und -oberfläche in die Datenstruktur der DBS ist es außerdem möglich, das Simulationsprogramm direkt mit der Datenhaltung zu verknüpfen. Damit werden die Anforderungen

der konzeptionellen Struktur des theoretischen Modells sowie die Anforderungen der Kriterien „Kapazität“ und „Bequemlichkeit“ erfüllt.

Da die weitere Modellierung auf einen Offline-Betrieb beschränkt bleibt, werden auch keine hohen Anforderungen der Modellierung hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit gestellt, so dass ein durchschnittliches DBS auch dieses Kriterium realisiert.

Hinzu kommt bei DBS die Möglichkeit der einfachen Implementierung von szenarioorientierten Eingangsdaten, simulationssynchroner Erfassung der Ergebnisdaten sowie der Gestaltung einer interaktiven Simulationsumgebung, womit auch die zusätzlichen Anforderungen verwirklicht werden.

Letztlich bieten DBS im Vergleich zu spezialisierten, mikroanalytischen Simulationssprachen den Vorteil, dass sie kostengünstig und auf (fast) allen Rechnern lauffähig sind, womit auch die letzten beiden Kriterien der vorhandenen Hardware und der Kosten erfüllt werden. Dies führt schließlich zur Wahl eines DBS als Simulationswerkzeug für die Umsetzung des theoretischen Modells.

Die konkrete Umsetzung in ein lauffähiges Computermodell soll in dieser Arbeit nicht weiter thematisiert werden. Lediglich der prinzipielle Aufbau des gesamten Simulationssystems, das aus drei Datenbanken besteht, kann der Abbildung 2.18 entnommen werden.

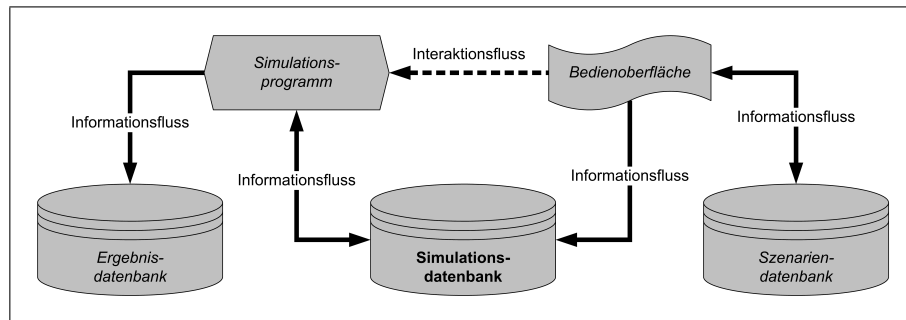


Abbildung 2.18.: Prinzipieller Aufbau des Computermodells

Zentrum des Systems ist eine Datenbank, die alle einzelnen Objekte, deren indikativen und relativen Attribute sowie die sonstigen Zustandsinformationen vorhält. Daneben verknüpft diese Datenbank das eigentliche Simulationsprogramm mit den zugrunde liegenden Daten und stellt die Interaktionsoberflächen für die Steuerung des gesamten Simulationssystems zur Verfügung. Von diesen Oberflächen versuchen die Abbildungen auf den Seiten 133 und 134 im Anhang einen Eindruck zu vermitteln.

In der zweiten Datenbank sind die Eingangsdaten der Simulationen, jeweils in Szenarien organisiert, abgelegt und können so jederzeit mit den Ergebnissen der Simulationen zusammen ausgewertet werden. Diese Ergebnisse werden während eines Simulationslaufs je Zeitschritt in der dritten Datenbank festgehalten, die für jeden Lauf neu erstellt wird.

Damit ist, als Abschluss der theoretischen Fundierung des Modells, auch die Untersuchungsmethodik inklusive der Umsetzung des angestrebten Simulationsmodells in einem dreiteiligen Datenbanksystem skizziert.

## 2.4. Rekapitulation der grundlegenden Annahmen

Festzuhalten bleibt, dass als Zielstellung in der Arbeit quantitative, kausaltheoretisch fundierte Prognosen zu Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen angestrebt werden. Diese Prognosen werden mit Hilfe von Simulationsuntersuchungen an einem Computermodell gewonnen, das auf ein formales, mikroanalytisches Strukturmodell aufbaut.

Für den Aufbau des Modells kommt die Kapitalwertmethode als Kern eines Investitionsentscheidungsprozesses zur Anwendung. Der Prozess der Investitionsentscheidung wiederum formt im Verständnis dieser Arbeit das Bild einer Adoptionsentscheidung. Diese Adoptionsentscheidung spiegelt die Ausrüstungsentscheidung für die einzelnen Betriebsmitteleinheiten des zweigeteilten Eisenbahnsystems, Fahrzeuge und Kilometer, hinsichtlich eines Zugbeeinflussungssystems auf einer mikroanalytischen Ebene wider.

Aus dieser Zweiteilung des Bahnsystems entsteht eine Komplementarität zwischen den Objekten jeder Seite sowie ein Zwang zur Kompatibilität, woraus sich Wirkungen von Netzeffekten im Rahmen der betrachteten Ausrüstungsentscheidung ableiten lassen. Demzufolge wird davon ausgegangen und in die Modellierung integriert, dass die Verbreitung der jeweils komplementären und kompatiblen Systemtechnik die Ausrüstungsentscheidung beeinflusst.

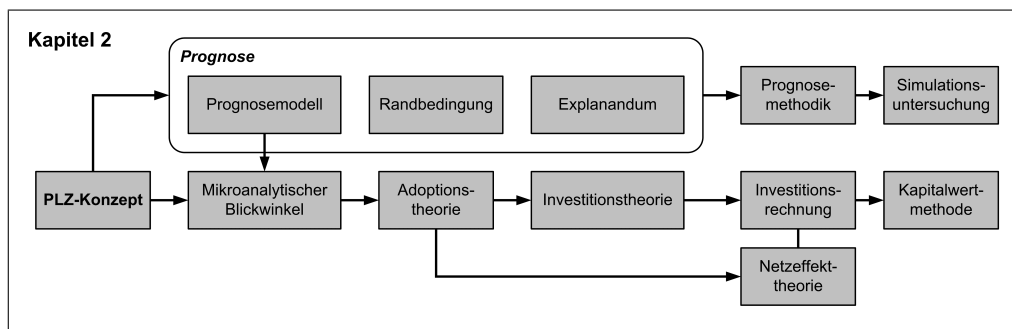


Abbildung 2.19.: Rekapitulation der theoretischen Fundierung

Gekoppelt wird diese Entscheidung an die Alterung der Zugbeeinflussungssysteme sowie der übergeordneten Betriebsmitteleinheiten, so dass sich in der Modellierung eine Dynamik entlang der gegebenen Altersstrukturen entwickelt.

Die Gesamtheit der installierten Zugbeeinflussungssysteme auf der mikroanalytischen Ebene definiert in einer aggregierten Perspektive die makroanalytische Ebene. Die Entwicklung dieser makroanalytischen Ebene, abgetragen über die Zeit, formt letztlich die Produktlebenszyklen, die das eigentliche Prognoseziel dieser Arbeit darstellen.

In den folgenden Kapiteln wird das korrespondierende Modellbild des Systems Eisenbahn entworfen, in das die Überlegungen aus diesem Kapitel einfließen. Abschließend, im Kapitel 4, wird das Simulationsmodell an einigen Fallbeispielen validiert bzw. als Prognosewerkzeug benutzt.

### 3. Konkretisierung des Modellbildes des Systems Eisenbahn

Ziel dieses Kapitels ist es, ein Modellbild zu entwickeln, in das die zentralen, theoretischen Überlegungen des vorangegangenen Kapitels 2, die mikroanalytische Sichtweise, die Anlehnung an die Netzeffekttheorie, die Abbildung des Adoptionsprozesses durch einen Investitionsprozess und schließlich die Entscheidungsfindung mittels der Kapitalwertmethode, als der Kern der Modellierung, integriert werden können.

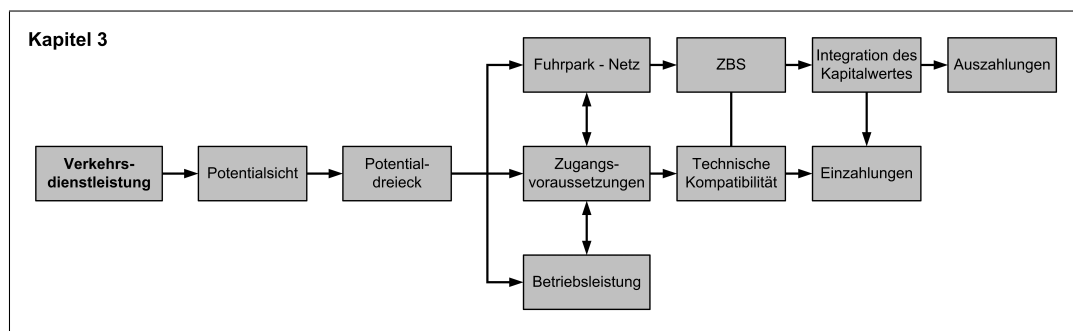


Abbildung 3.1.: Übersicht des Vorgehens entlang der Modellbildung

Dafür wird von dem Begriff der „Verkehrsdienstleistung“ ausgegangen, um hieraus einen potentialorientierten Blickwinkel und schließlich ein für Eisenbahnsysteme charakteristisches Potentialdreieck zu entwickeln.

Entlang dieses Potentialdreiecks wird das Modellbild mit der theoretischen Fundierung aus Kapitel 2 zusammengeführt. Zentraler Ansatzpunkt ist hierfür die Konkretisierung und die anschließende Integration des Kapitalwertes in das Modellbild. Damit wird das elementare Entscheidungskriterium hinsichtlich der Ausrüstung von Betriebsmitteleinheiten mit einem Zugbeeinflussungssystem ins Modell integriert.

In einem letzten Schritt wird dieser Kern des entwickelten Modells um zwei grundlegende Module erweitert und in einem lauffähigen Simulationsmodell umgesetzt.

#### 3.1. Die Verkehrsdienstleistung aus der Potential-sicht

Den Ausgangspunkt des eisenbahntechnischen und ökonomischen Modellbildes im Sinne der Arbeit formt der Begriff der „Transportdienstleistung“ bzw. der synonym verwendete Begriff der „Verkehrsdienstleistung“. Dabei wird für eine einführende Definition der Auffassung von Meffert gefolgt:

“Verkehrsdienstleistungen [werden] [...] als selbständige marktfähige Leistungen [verstanden], die mit der Bereitstellung und/oder dem Einsatz von Leistungsfähigkeiten zur Überwindung von räumlichen Distanzen verbunden sind (Potentialorientierung), in deren Erstellungsprozess interne und externe Faktoren kombiniert werden (Prozessorientierung) und deren Faktorkombination mit dem Ziel eingesetzt wird, Ortsveränderungen von Personen (oder Gütern) vorzunehmen [(Ergebnisorientierung)]“ [105, S. 7f.]

Für die Arbeit ist herauszustellen, dass die Verkehrsdienstleistung ein handelbares Gut ist, dessen ökonomischer Wert in der, als immaterielle Leistung anzusehenden, Veränderung der Raumkoordinaten eines Leistungsobjektes liegt. Bei der Erstellung dieser Leistung wird ein Potential genutzt, das durch die Kombination von internen Produktionsfaktoren gebildet und durch das Hinzutreten des externen Produktionsfaktors, des Leistungsobjektes, synonym im Weiteren auch Transport- oder Verkehrsobjekt, zur eigentlichen Verkehrsdienstleistung wird. [30, S. 21f.]

Als wesentliches Merkmal unterstreicht Aberle „die Identität der Produktion der Leistung und ihres Absatzes, [somit] die fehlende Lagerfähigkeit“. [1, S. 230]

Die Leistungsobjekte sind für die Modellierung auf Personen und Güter beschränkt und schließen somit Informationen und nominale Güter aus.

Die Hervorhebung der Marktfähigkeit grenzt die Untersuchung gegen Verkehrsdienstleistungen im eigenen Interesse und Verfügungsbereich, wie zum Beispiel Werks- und innerbetriebliche Verkehre, ab.

Durch die Begrenzung der Leistung auf die reine Raumüberbrückung bleiben zeitliche Eigenschaftsänderungen der Leistungsobjekte, soweit sie nicht für die Ortsveränderung benötigt werden, ebenfalls unberücksichtigt. Damit entsteht eine Abgrenzung zur Logistik als übergeordneter Bereich, die neben dem Transport auch Leistungen wie Lagerhaltung, Verpackung oder Warenumschlag beinhaltet. [101, S. 21]

Zur Unterscheidung und Operationalisierung der potentiellen und der „verkauften Leistung“ stehen sich die Begriffspaare „Betriebsleistung“ und „Verkehrsleistung“ („Transportleistung“) gegenüber. [62, S. 85]

Dabei soll unter Verkehrsleistung, dem kaufmännischen Ansatz folgend, „das am Verkehrsmarkt gehandelte Gut [...] der Ortsveränderung einer gewissen Menge und Sorte an Verkehrsobjekten (Güter, Personen [...]) über eine bestimmte Distanz“ verstanden werden. Diese Verkehrsleistung, die eine „statistische Maßzahl“ der Verkehrsdienstleistung darstellt, wird durch das Produkt aus Entfernung und Masse bzw. Personen gebildet und in der Einheit Tonnenkilometer [*tkm*] bzw. Personenkilometer [*pkm*] angegeben. [5, S. 29]

Demgegenüber steht die Betriebsleistung als Potential für „die angebotene Leistung, gemessen in [...] Zugkilometern“ [*Zgkm*] oder Trassenkilometern [*Trkm*]. [62, S. 85]

Damit ist die Unterscheidung zwischen der „Betriebsleistung“ und der „Verkehrsleistung“ im Hinzutreten des Leistungsobjektes zu sehen.

Abbildung 3.2 versucht die Begriffsentwicklung bis zu diesem Punkt zu reflektieren, wobei die drei Blickwinkel, prozess-, ergebnis- und potentialorientiert, explizit hervorzuheben sind.

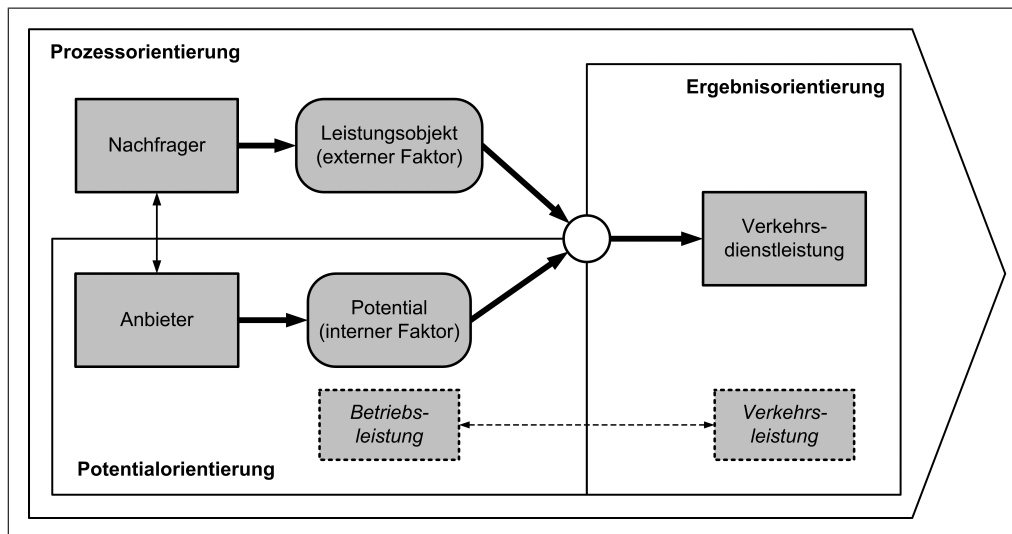


Abbildung 3.2.: Dimensionen der Verkehrsdienstleistung

Aus der Ergebnisorientierung lässt sich eine weiterführende Charakterisierung der Leistungsbegriffe ableiten, die die Eigenschaften der Ortsveränderung in den Mittelpunkt stellt. Als zentrale Eigenschaften für diese Untersuchung sind folgende Punkte anzuführen:

1. die grundlegende Unterscheidung der Leistungsobjekte in Personen und Güter,
2. die (maximale und durchschnittliche) Geschwindigkeit,
3. die (durchschnittliche) Transportweite,
4. die Kapazität des Verkehrsträgers Eisenbahn und seiner Teilsysteme sowie
5. die Sicherheit bzw. das Risiko für die Leistungsobjekte während der Ortsveränderung bzw. Leistungserbringung.

Diese Eigenschaften wiederum werden für die weitere Arbeit als Dimensionen einer Kategorisierung der Verkehrsdienstleistung sowie der Verkehrsmittel herangezogen. Wie sich gerade in der Kategorisierung der Verkehrsmittel im weiteren Verlauf zeigen wird, eröffnet dies die Möglichkeit einer Differenzierung des Modellbildes des Gesamtsystems Eisenbahn.

Die Kategorisierung der Verkehrsdienstleistung als erster Schritt wird entlang der Dimensionen der Leistungsobjekte, der Geschwindigkeit und der Transportweite vollzogen und in einem späteren Zusammenhang im Abschnitt 3.4.2 konkretisiert.

Die Übertragung dieser Kategorisierung auf die Betriebsleistung kann direkt in die Modellierung übernommen werden, da die Unterscheidung zwischen Betriebs- und Verkehrsleistung „lediglich“ im Hinzutreten des Leistungsobjektes besteht und die betrachteten Eigenschaften der Ortsveränderung bereits im angebotenen Potential angelegt sind.

### 3.2. Der Verkehrsdienstleister als Verkehrsbetrieb

Für die weitere Modellierung liegt der Fokus auf der potentialorientierten Sichtweise. Aus diesem Blickwinkel ist die „Leistungsfähigkeit des Anbieters“ [30, S. 21] als das eigentliche Absatzobjekt anzusehen.

Auf der einen Seite folgt dieser verengten Sichtweise jedoch das Problem, dass der Nutzen, der dem Nachfrager erwächst, aus der Betrachtung herausfällt. Damit entfallen auch prinzipiell die Erlöse, die durch den Absatz der Verkehrsleistung dem Anbieter zufließen. Lediglich der Aufwand, der durch die Bereitstellung und Aufrechterhaltung des Potentials entsteht, kann dem Anbieter aus diesem Blickwinkel direkt zugeordnet werden, Abbildung 3.3.

Indem eine monetäre Bewertung des internen Potentialfaktors in die Betrachtung integriert wird, kann diesem Problem entgegengetreten werden. Diese monetäre Bewertung, die sich aus der Umsetzung von Betriebsleistung in Verkehrsleistung und der abschließenden monetären Bewertung dieser zusammensetzt, ist eng mit dem Problem der Kapazität und Auslastung der Verkehrsmittel verbunden. [1, S. 27, S. 233]

Letztlich müssen über die gesamte Wirkungskette der monetären Bewertung Annahmen zu den jeweiligen Teilaspekten getroffen werden. Für die Modellierung werden diese Annahmen je Kategorie der Betriebsleistung in einen Koeffizienten zusammengeführt, der modellexogen für die Simulationsuntersuchungen definiert werden muss.

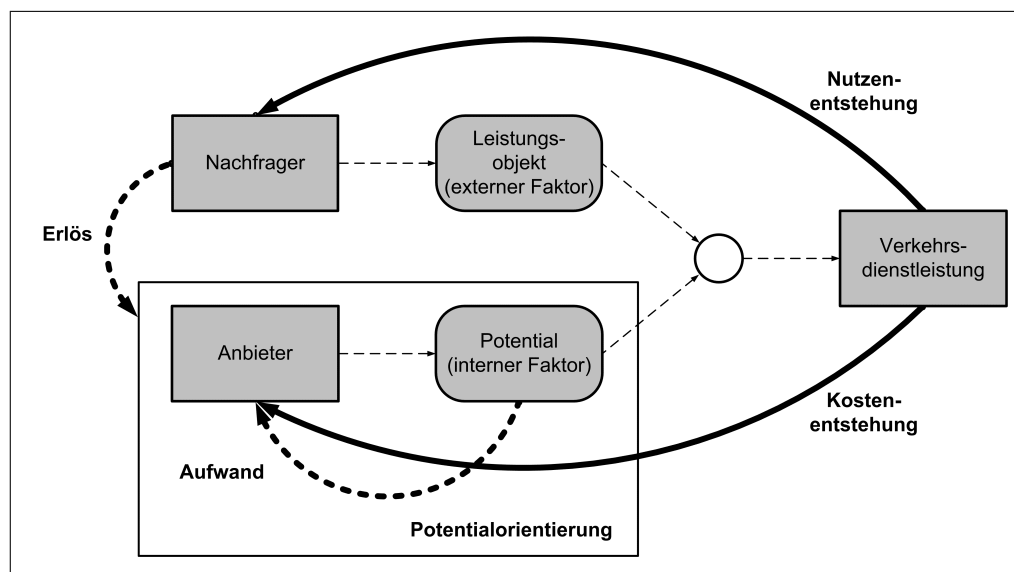


Abbildung 3.3.: Nutzen- und Kostenverläufe der Verkehrsdienstleistung

Auf der anderen Seite wird es durch die Potentialorientierung aber möglich, den Anbieter „als eine planvoll organisierte Wirtschaftseinheit“ aufzufassen und somit als „Betrieb“ zu bezeichnen, „der [...] Dienstleistungen erstellt und [absetzt].“ [160, S. 2] Da die betrachtete Dienstleistung in der unmittelbaren „Ortsveränderungsleistung“ liegt, ist der Anbieter im Sinne dieser Arbeit als Verkehrsbetrieb im engeren Sinne charakterisiert.

[62, S. 82]

Mit dieser Sichtweise, die den Betrieb „im Sinne der Produktionswirtschaft“ [160, S. 4] definiert, lassen sich zum einen die Ziele des Verkehrsbetriebes eingrenzen sowie zum anderen die Produktion des internen Potentialfaktors als Prozess der Leistungserstellung durch die Kombination von Produktionsfaktoren beschreiben.

Als *Ziel* jedes Verkehrsbetriebes wird im Weiteren unterstellt, dass die Produktionsfaktorkombination unter Wahrung des Wirtschaftlichkeitsprinzips und unter Einhaltung des finanziellen Gleichgewichts stattfindet. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Triebfeder jedes Handelns eines Betriebes „das erwerbswirtschaftliche Prinzip [ist], d.h. [...] bei der Leistungserstellung und -verwertung das Gewinnmaximum“ angestrebt wird. [160, S. 6]

Dies ist jedoch gerade im Hinblick auf Verkehrsbetriebe der Eisenbahnbranche als Annahme zu kennzeichnen und zu diskutieren, da in und durch diese Verkehrsbetriebe eine Vielzahl von Zielen mit eigen- und gemeinwirtschaftlichem Charakter durch verschiedenste Akteure verfolgt wird, die teilweise konfliktieren.

Das Gutachten zur „Privatisierung der integrierten Deutschen Bahn AG“ [25] zeigt diese Zielkonflikte beispielhaft entlang der Eigentumsverhältnisse der Deutschen Bahn AG auf, Abbildung 3.4.

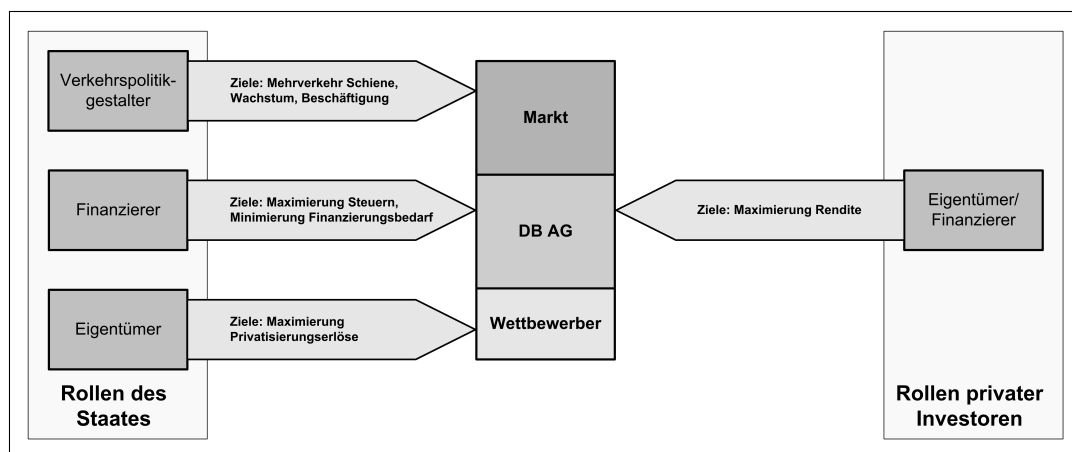


Abbildung 3.4.: Zielkonflikte entlang der DB AG als Verkehrsbetrieb (Quelle: vgl. [25, S. 42])

Im Zuge der Bahnreform ist jedoch seit 1993 ein Prozess zu beobachten, der „durch Einführung von Marktprinzipien und unternehmerischer Eigenständigkeit der Bahn diese von Weisungen und Vorgaben der Politik unabhängig“ [22] machen will und damit die Trennung von eigen- und gemeinwirtschaftlichen Zielen anstrebt. Ableiten lässt sich dies auch u.a. aus dem „Deutsche Bahn Gründungsgesetz“ (DBGrG)<sup>1</sup> und dem „Allgemeinen Eisenbahngesetz“ (AEG)<sup>2</sup>.

Das PRIMON-Gutachten klassifiziert diese Maßnahmen als geeignet, um Prinzipien für eine „privatwirtschaftliche Unternehmensführung“ bei der Deutschen Bahn AG zu instal-

<sup>1</sup>§ 3 Abs.1 Anstr. 1, 2, 3 DBGrG [36]

<sup>2</sup>§ 15 Abs. 1, 2 AEG [3]



lieren und damit betriebliches Handeln auf die „Wirtschaftssteuerung des Unternehmens zu fokussieren“. [12, S. 53]

Flankiert werden diese Maßnahmen durch die stetig wachsende Zahl der privaten Eisenbahnverkehrsbetriebe am Markt der Eisenbahnverkehrsdienstleistungen, die zum Großteil dem erwerbswirtschaftlichen Prinzip unterliegen und danach ihr Handeln ausrichten.

Demzufolge umschreibt die getroffene Annahme hinsichtlich des erwerbswirtschaftlichen Prinzips in der Eisenbahnbranche, auf der einen Seite einen Teil des Zustandes bzw. der Funktionsparameter der Branche. Auf der anderen Seite ist hierin das anvisierte Ziel der weiteren Entwicklung der Eisenbahnbranche zu sehen. Somit kann diese Annahme als Grundlage in die Modellierung einfließen.

### 3.2.1. Die Verkehrsmittel & Verkehrswege als zentrale Betriebsmittel

Bei der Betrachtung der *Produktionsfaktoren*, prinzipiell in die „Faktoren Arbeit, Betriebsmittel und Werkstoffe“ [160, S. 5] unterschieden, stehen die Betriebsmittel im Zentrum. Diese werden, Wöhe folgend, als „die gesamte technische Apparatur, deren sich der Betrieb zur Durchführung des Betriebsprozesses bedient“ [160, S. 310], begriffen.

Für den Verkehrsbetrieb stellen die Verkehrsmittel, im weitesten Sinne verstanden, die Betriebsmittel dar, da sie die „Gesamtheit der stationären bzw. mobilen sowie der materiellen bzw. immateriellen Arbeits- bzw. Produktionsmittel“ umfassen. [5, S. 30]

Die Modellierung verengt diese Sichtweise weiter auf die zwei zentralen Betriebsmittel, die Verkehrsmittel im engeren Sinne und die Verkehrswege. Aberle stellt hierzu fest, dass die Notwendigkeit des simultanen Einsatzes dieser beiden Betriebsmittel für die Transportwirtschaft allgemein und für die Eisenbahn insbesondere eine „Produktionsfunktion mit variabler Komplementarität“ definiert. [1, S. 231]

Für die weitere Modellierung lassen sich für die Verkehrsmittel im engeren Sinne (i.e.S.) und die Verkehrswege die nachfolgenden Definitionen fassen.

Als VERKEHRSMITTEL (i.e.S.) werden die mobilen Einheiten verstanden, die unter Benutzung der Verkehrsinfrastruktur, insbesondere der Verkehrswege, die Betriebsleistung erbringen.

Die Gesamtheit dieser Betriebsmitteleinheiten wird auch als Fuhrpark bezeichnet und setzt sich aus einzelnen Fahrzeugen zusammen.

Einer Einteilung der Eisenbahnfahrzeuge durch Pachl folgend, ist die Gruppe aller Fahrzeuge in Regel- und Nebenfahrzeuge zu unterscheiden. Dabei müssen Regelfahrzeuge den Vorschriften der EBO [40] entsprechen und werden vorwiegend zur Erbringung der eigentlichen Betriebsleistung eingesetzt. [119, S. 11]

Im Gegensatz dazu stellen Nebenfahrzeuge Eisenbahnfahrzeuge für gesonderte Aufgabenbereiche, wie Instandhaltung oder Noteinsätze, dar, die nur begrenzt den Vorschriften der EBO [40] unterliegen. Diese Gruppe fließt nicht in die Modellierung ein.

Auf der Stufe der Regelfahrzeuge unterscheidet diese Taxonomie, Abbildung 3.5, zwischen Triebfahrzeugen und Wagen, wobei die Triebfahrzeuge als Unterscheidungsmerkmal über einen eigenen Antrieb verfügen [119, S. 12]. Für die Modellierung werden nur diese

Triebfahrzeuge berücksichtigt, da lediglich diese Einheiten mit einem Zugbeeinflussungssystem ausgerüstet sind.

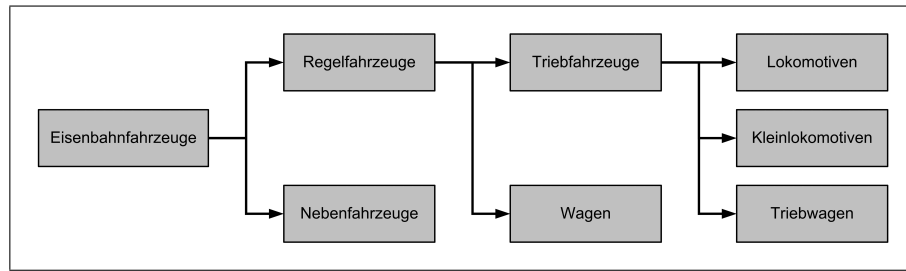


Abbildung 3.5.: Taxonomie der Fahrzeuge (Quelle: vgl. [119, S. 12])

Ausnahmen hierzu bilden Steuerwagen, die als Wagen mit Führerstand über keinen eigenen Antrieb verfügen und nach dieser Taxonomie zu den Wagen zu zählen sind. Aus einem Steuerwagen heraus kann das Triebfahrzeug vom anderen Ende des Zuges, dann als „Wendezug“, bedient werden, wodurch Fahrtrichtungswechsel rationeller gestaltet werden können. Da diese Steuerwagen ebenfalls mit Zugbeeinflussungssystemen ausgerüstet sind, sind sie für die Modellierung zu den Triebfahrzeugen und damit zu den berücksichtigten Fahrzeugen zu zählen.

Die weitere Unterteilung unterhalb der Triebfahrzeuge wird für die Modellierung nicht nachvollzogen, so dass sich die oben definierten Fahrzeuge als Verkehrsmittel i.e.S. aus den Triebfahrzeugen der Regelfahrzeuge, zuzüglich der Steuerwagen, rekrutieren. Im Weiteren wird diese betrachtete Gruppe auch synonym als Verkehrsmittel bezeichnet.

Um eine Kategorisierung, analog zur Betriebsleistung, einzuführen, wird diese Menge der Fahrzeuge entlang der zentralen Dimensionen der Verkehrsleistung, den Transportobjekten, der Geschwindigkeit und der Transportweite kategorisiert. Damit zeichnet sich bereits hier für die Modellierung ein enger, direkter Bezug zwischen der Betriebsleistung und dem Fuhrpark ab.

Die VERKEHRSWEGE sind, neben den Verkehrsanlagen und den Verkehrsstationen, ein Teil der Verkehrsinfrastruktur [1, S. 26] und werden im Sinne der Arbeit durch die Hauptgleise gebildet. Als Hauptgleise werden die Gleise begriffen, „die planmäßig von Zügen befahren werden dürfen.“ [119, S. 10]

Die Verkehrswege setzen sich aus der Menge einzelner (Strecken-)Kilometer zusammen und werden in der Gesamtheit im Folgenden synonym auch als Netz und Infrastruktur bezeichnet.

Als das herausragende Abgrenzungskriterium der Hauptgleise zu den Nebengleisen führt Pacht die Sicherungsanlagen an, die zugfahrtabhängig für die Hauptgleise vorgeschrieben sind, so dass bereits in dieser Definition eine direkte Verbindung zum Untersuchungsgegenstand besteht. [119, S. 10]

Die detaillierte, bauliche Differenzierung der Verkehrswege in einzelne Bestandteile (wie z.B. Schienen, Schwellen, Schienenbefestigungsmittel oder Unterbau etc.) wird für

die Modellierung nicht berücksichtigt und geht lediglich über die Definition von Eigenschaften ein. Sie ist damit implizit in die Kategorisierung des Netzes eingebunden.

Prinzipiell richtet sich diese Kategorisierung der Verkehrswege wiederum an den Charakterisierungsdimensionen der Verkehrsleistung aus. Dabei kommen die Dimensionen der Geschwindigkeit und der Kapazität, hier als Leistungsfähigkeit [119, S. 247] direkt auf den Verkehrsweg bezogen, zum Tragen.

Im Zusammenhang mit der Modellierung ist herauszustellen, dass bei der Abbildung der Infrastruktur durch eine Menge von - einzelnen - Kilometern jegliche Rauminformationen verloren gehen. Auch um dieser Einschränkung entgegenzuwirken, wird die beschriebene Kategorisierung der Gleise eingeführt. Trotzdem ist darauf hinzuweisen, dass die Topologie als Zustandsinformation eines Netzes innerhalb einer Netzkategorie bei der dargestellten Modellierung weitestgehend verloren geht.

Weiterhin muss betont werden, dass für die Untersuchung die Anlagen der Signalsysteme und der streckenseitigen Zugbeeinflussungssysteme zu den Verkehrswegen gezählt werden und somit in die Modellierung Eingang finden. Dagegen werden die Stellwerke in der Arbeit zur Dimension der Verkehrsanlagen gezählt und nicht in die Modellierung einbezogen werden.

Diese Trennung zwischen den Untersuchungsobjekten und den Stellwerken ist explizit als Annahme hervorzuheben, da sie entlang der funktionalen Sicherheitskette im Eisenbahnsystem eine teilweise willkürliche Trennung darstellt.

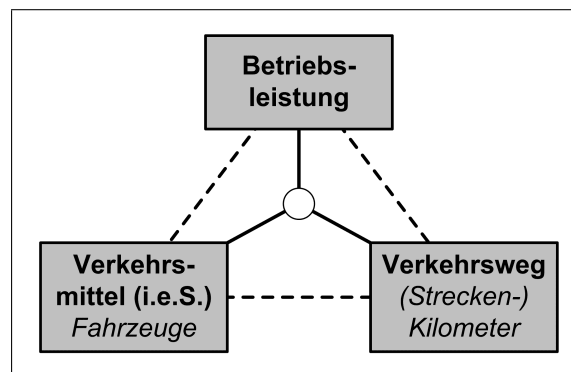


Abbildung 3.6.: Verkehrsdienstleistung als „Potentialdreieck“

Für die Weiterentwicklung des Modells in fortführenden Forschungsarbeiten sollte es somit Ziel sein, die Entwicklung der Zugbeeinflussungssysteme und der Stellwerke aus dem Blickwinkel der ganzheitlichen Sicherungskette gemeinsam zu betrachten und zu modellieren. Da aber in der Abbildung der Evolution der Stellwerkstechnik eine eigenständige Aufgabe der Modellierung zu sehen ist, wird im Rahmen dieser Arbeit von dieser Verknüpfung Abstand genommen.

Damit bleibt vorerst zusammenzufassen, dass für die weitere Arbeit die Produktion der Verkehrsdienstleistung aus der Potentialsicht auf das Dreieck Verkehrsmittel, Verkehrsweg und Betriebsleistung eingengt wird und dass das Unternehmen, das über die Potentialfaktoren verfügt, als Verkehrsbetrieb und als zentraler Akteur in der vorliegen-

den Untersuchung charakterisiert ist, siehe Abbildung 3.6.

### 3.2.2. Die Betriebsmittel im Rahmen des gesamtbetrieblichen Handelns

Da der Fuhrpark und die Infrastruktur als Betriebsmittel des Verkehrsbetriebs definiert sind, ist deren Beschaffung, die Vorhaltung und die Benutzung vollständig auf das Ziel des Verkehrsbetriebs, die Produktion der Betriebsleistung bzw. den Absatz von Verkehrsleistung ausgerichtet. Daraus lässt sich ableiten, dass das erwerbswirtschaftliche Prinzip aus dem gesamtbetrieblichen Handeln auch für diesen Teilbereich gilt.

Dieses erwerbswirtschaftliche Prinzip lässt sich weiter von der Ebene der Betriebsmittel auf die Beschaffung und Ausrüstung der einzelnen Einheiten übertragen. Somit kann letztendlich das erwerbswirtschaftliche Prinzip auch auf die Ausrüstungsentscheidung einer Betriebsmitteleinheit mit einem Zugbeeinflussungssystem transferiert werden.

Parallel zu diesen Überlegungen können an diesem Punkt die Modellkonstrukte des Investitionsprozesses und der Investitionsrechnung, insbesondere die Beschränkung der Zieldefinition auf die singuläre, monetäre Größe des „Totalgewinns“ [81, S. 11], aus dem Kapitel 2.2.2 in die weitere Modellierung der Ausrüstungsentscheidung einfließen.

Bevor jedoch diese Abbildung der Investitionsentscheidung weiter verfolgt wird, sind zwei Aspekte zu diskutieren, die durch die grundsätzliche Trennung des Eisenbahnsystems in die Seiten Verkehrsmittel i.e.S. und Infrastruktur entstehen und die von zentraler Bedeutung für die weiterführende Modellierung sind - die Wirkung auf die Organisation der Verkehrsbetriebe sowie die Ausgestaltung von Zugangsbedingungen der Infrastruktur gegenüber den Verkehrsmitteln.

### 3.2.3. Die Wirkung der Betriebsmittel auf die Organisation der Verkehrsbetriebe

Der eben aufgezeigten Trennung des Eisenbahnsystems folgt in zunehmendem Maße auch die Organisation der bisher monolithischen Verkehrsbetriebe.

Bis Anfang der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts lag in Europa der Besitz und das Eigentum an den Potentialfaktoren bei einer organisatorischen, oftmals staatlichen Einheit, wie zum Beispiel der Deutschen Bundesbahn in Deutschland. Diese Konstellation hat sich jedoch im Laufe der letzten Jahre auch im Zuge der Richtlinie (RL) 91/440/EWG [55] geändert.<sup>3</sup>

Unter diesem Gesichtspunkt tritt für die Arbeit die Schaffung getrennter organisatorischer Einheiten für die Verkehrsmittel und die Infrastruktur in den Vordergrund. Die Richtlinie 91/440/EWG [55] spricht hierbei von dem „Eisenbahnunternehmen“ und dem „Infrastrukturbetreiber“.

Die zentralen Unterscheidungskriterien sind dabei zum einen das „Erbringen von Eisenbahnverkehrsleistungen“<sup>4</sup> unter Sicherstellung der Traktion für das Eisenbahnunternehmen sowie „die Einrichtung und die Unterhaltung der Fahrwege der Eisenbahn“<sup>5</sup> für den

---

<sup>3</sup>Abschnitt III RL 91/440/EWG [55]

<sup>4</sup>Art. 3 Anstr. 1 RL 91/440/EWG [55]

<sup>5</sup>Art. 3 Anstr. 2 RL 91/440/EWG [55]

Infrastrukturbetreiber. Weiterhin wird in dieser Richtlinie die wirtschaftliche Trennung beider Teilsysteme explizit festgeschrieben.<sup>6</sup>

Das AEG [3] definiert auf der einen Seite den Eisenbahninfrastrukturbetreiber (EIB) als Unternehmen, „das den Betrieb, den Bau und die Unterhaltung der Schienenwege der Eisenbahn zum Gegenstand hat“<sup>7</sup>, sowie auf der anderen Seite die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU), die unter Nutzung der Verkehrsmittel „die Eisenbahnverkehrsleistungen erbringen“<sup>8</sup> und vermarkten. Beide Akteure müssen nach dem AEG<sup>9</sup> durch eine Genehmigungsbehörde explizit zugelassen werden.

Diese Trennung zwischen Infrastruktur und Verkehr soll im Weiteren jedoch nicht Gegenstand der Diskussion sein, sondern als Faktum, beschränkt auf die Zuweisungsproblematik der Zugangsrechte von Fahrzeugen zur Infrastruktur und die Separierung der jeweiligen Verfügungsrechte über die Betriebsmittel, für die Modellierung aufgegriffen werden.

Unter dem Zugangsrecht wird, weiter der Richtlinie 2001/14/EG [58] folgend, eine Zugtrasse oder Trasse, also „die Fahrwegskapazität, die erforderlich ist, damit ein Zug zu einer bestimmten Zeit zwischen zwei Orten verkehren kann“<sup>10</sup>, verstanden.

Für die damit einhergehende Zuweisungsproblematik wird implizit durch die Richtlinie 2001/14/EG<sup>11</sup> sowie die Richtlinie 91/440/EWG<sup>12</sup> festgeschrieben, dass sie über einen diskriminierungsfreien (Markt-)Mechanismus zu erfolgen hat.

Dies bedeutet auf der einen Seite, dass der EIB Zugtrassen auf seiner Infrastruktur bereitstellt und diskriminierungsfrei zum Verkauf allen interessierten EVUs anbietet. Auf der anderen Seite kann jedes EVU diese Zugangsrechte nachfragen und erwerben, um sie dann wiederum zur Erstellung der eigentlichen Betriebsleistung zu nutzen.

In deutsches Recht hat dieser Sachverhalt im § 14 AEG [3] oder in die „Verordnung über den diskriminierungsfreien Zugang zur Eisenbahninfrastruktur“ (EIBV) [43] Einzug gehalten.

Für die Modellierung geht damit einher, dass die Produktion der Betriebsleistung, des internen Potentialfaktors der Verkehrsdienstleistung, in zwei Stufen zerfällt. Somit kann diese Produktion als Wertschöpfungskette oder „Supply Chain“ aufgefasst werden, wobei die Aussage von Chopra und Meindl für eine Definition Anwendung findet: „A supply chain consists of all stages involved, directly or indirectly, in fulfilling a customer request.“ [27, S. 3]

Abbildung 3.7 versucht diese Sichtweise einer Wertschöpfungskette in den potentialorientierten Blickwinkel zur Verkehrsdienstleistung, die das Endprodukt der „supply chain“ darstellt, einzubinden und dabei den Fluss der Leistungen und Erlöse darzustellen.

Für die Modellierung bedeutet diese organisatorische Trennung auch die vollständige Trennung von EIB und EVU hinsichtlich der Entscheidungen über die Vorhaltung ihrer

---

<sup>6</sup> Abschnitt III RL 91/440/EWG [55]

<sup>7</sup> § 2 Abs. 3a AEG [3]

<sup>8</sup> § 2 Abs. 1 AEG [3]

<sup>9</sup> § 6 AEG [3]

<sup>10</sup> Art. 2 Abs. 1 RL 2001/14/EG [58]

<sup>11</sup> Kapitel II RL 2001/14/EG [58]

<sup>12</sup> Abschnitt III, Art. 8 RL 91/440/EWG [55]

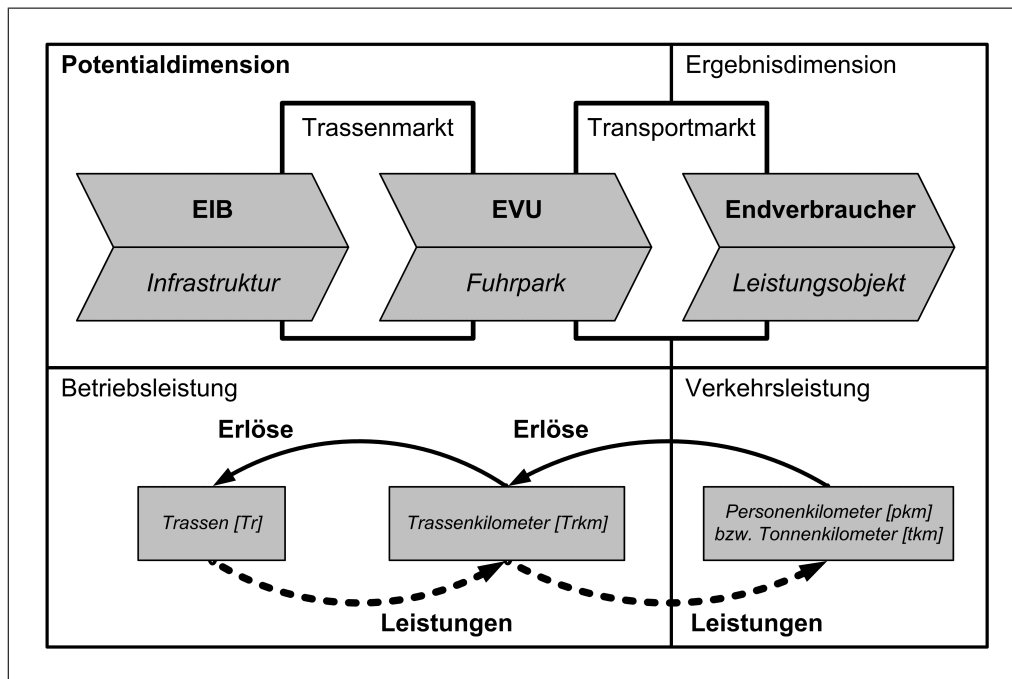


Abbildung 3.7.: Die Wertschöpfungskette der Verkehrsdienstleistung aus Potentialsicht

zentralen Betriebsmittel, der Verkehrsmittel und der Infrastruktur. Die Koordination aller Interaktionen bezüglich der Betriebsmittel beider Akteure erfolgt somit nur noch vermittelt über den Trassenmarkt.

Weiterhin bedeutet diese organisatorische Trennung die Trennung der Erlöse und Aufwendungen, die durch die Vermarktung bzw. Produktion der Betriebsleistung entstehen. Flossen die Erlöse aus der Vermarktung der Betriebsleistung bis jetzt den Verkehrsbetrieben als monolithische Einheit zu, verbleiben diese Erlöse nun vollständig beim EVU. Diesem entstehen wiederum durch den Erwerb von Zugangsrechten für die Infrastruktur Aufwendungen, die dem EIB als Erlöse zufließen. Somit partizipiert das EIB nur indirekt an den Erlösen der Verkehrsdienstleistung.

Letztlich bleibt festzuhalten, dass Investitions-, Ausrüstungs- und Entwicklungsentscheidungen hinsichtlich der Betriebsmittel durch die faktische Trennung auf beiden Seiten weitestgehend autonom getroffen werden. Dadurch können verschiedene, auch gegenläufige Interessen verfolgt werden, was als direkte Wirkung der organisatorischen Trennung von Infrastruktur- und Fuhrparkbetreiber aufgefasst wird.

Hieraus wird für diese Untersuchung abgeleitet, dass, da das Eisenbahnsystem nicht mehr als Gesamtsystem betrachtet werden kann, konzertierte Entwicklungs- oder Migrationskonzepte für die Evolution der Betriebsmittel auf beiden Seiten, wie zum Beispiel die Einführung von Subsystemen, nicht mehr oder nur mit einem weitaus höheren Koordinationsaufwand durchführbar sind als in der Vergangenheit der monolithischen Verkehrsbetriebe.

Für die Modellierung wird dem dadurch Rechnung getragen, dass die Investitions-

entscheidung über die Einführung von Zugsicherungssystemen für jede Seite, Netz und Fuhrpark, getrennt gefällt wird. Damit entsteht ein Bild einer dezentralen Entscheidungsfindung, die Komplementarität, Kompatibilität und trassenmarktvermittelte Interaktion beider Seiten in das Zentrum der Betrachtungen stellt.

An diesem Punkt der dezentralen Entscheidungsfindung finden die Überlegungen zur theoretischen Fundierung auch entlang der Netzeffekttheorie aus dem Kapitel 2.2.1 Eingang in die konkrete Modellierung.

Weiterhin geht die Arbeit durch diese explizite Trennung der Entscheidungsfindung einen Schritt über einen großen Teil der Migrationsbetrachtungen auch im Hinblick auf ETCS hinaus. Diese zeigen in ihren Untersuchungen oftmals Migrationswege auf, die auf einem fixen Bezug zwischen Fahrzeugen und Strecke aufbauen. Über diese - fiktive - gleichzeitige Verfügungsgewalt eines Akteurs über beide Seiten eröffnen sich dann Migrationsmöglichkeiten, die so nicht - mehr - gegeben sind.

Diese Betrachtungsweisen blenden dadurch regelmäßig die autonome, jedoch wechselseitig beeinflusste Entscheidungsgewalt beider Seiten aus und ersetzen sie durch eine zentrale Koordination.

#### 3.2.4. Die Zugangsbedingungen als Schnittstellendefinition

Der zweite Aspekt, der sich mit der Trennung der Betriebsmittel eröffnet, ist das Feld der Zugangs- bzw. Nutzungsbedingungen, die seitens der Infrastruktur an die Fahrzeuge gestellt werden und die diese für einen Zugang erfüllen müssen. Hierbei lassen sich betriebliche, technische und rechtliche Dimensionen unterscheiden. Im Folgenden werden diese Zugangsbedingungen, synonym auch als Zugangsvoraussetzungen bezeichnet, diskutiert, soweit sie in diese Arbeit einfließen.

Die *rechtlichen* Zugangsvoraussetzungen bilden die Grundlage jeglicher Interaktion zwischen EVU und EIB, somit zwischen Fahrzeug und Netz. Diese erstrecken sich von der oben angeschnittenen Definition und Zulassung von EIBs und EVUs bis hin zu allgemeinen Zugangsrechten und -pflichten, wie zum Beispiel in der Richtlinie 2001/14/EG<sup>13</sup> oder im Allgemeinen Eisenbahngesetz<sup>14</sup> dargelegt.

Nach Maßgabe von Artikel 3 der Richtlinie 2001/14/EG [58] muss der EIB alle Voraussetzungen in den „Schienennetz-Nutzungsbedingungen“ zusammenfassen und veröffentlichen. Damit definiert er schließlich allgemeingültige Zugangsbedingungen und AUSSCHLUSSKRITERIEN für den Zugang von Schienenfahrzeugen zu „seiner“ Infrastruktur.

Die *betrieblichen* Bedingungen ergeben sich aus definierten Betriebsprogrammen, die auf einer gegebenen Infrastruktur abgewickelt werden sollen bzw. können. Bis auf die maximale Leistungsfähigkeit, die den „maximal möglichen Durchsatz einer Betriebsanlage bei einer bestimmten Struktur des Betriebsprogramms“ [119, S. 247] definiert, synonym auch als Kapazität bezeichnet, und die damit ein Ausschlusskriterium für weitere Zugfahrten darstellt, bleibt diese Dimension für die Arbeit weitestgehend unberücksichtigt. Lediglich bei der späteren Definition von „Erbringungssätzen“, die Kategorien der

---

<sup>13</sup> Art. 5, Anhang II RL 2001/14/EG [58]

<sup>14</sup> § 14 AEG [3]

Betriebsleistung anteilig bestimmten Netzkategorien zuordnen, kommen betriebliche Bedingungen implizit zum Tragen.

Mit den *technischen* Zugangsvoraussetzungen, die die zentralen Bedingungen für die Modellierung darstellen, ist der Begriff der „technischen Kompatibilität“ verbunden [108, S. 558]. Ausgehend von der - minimalen - Definition von Farrell und Saloner, die Produkte als kompatibel bezeichnen, „when their design is coordinated in some way, enabling them to work together“ [63, S. 1], wird unter technischer Kompatibilität folgender Sachverhalt verstanden.

TECHNISCHE KOMPATIBILITÄT zwischen Systemen oder Systemkomponenten bedeutet, dass diese derart beschaffen sind, dass sie prinzipiell zusammenwirken können, und in diesem Zusammenwirken ein definiertes Maß einer oder mehrerer Leistungsdimensionen erbringen.

Damit gelten auch Systeme und Systemkomponenten im Verständnis der Arbeit als inkompatibel, die ein definiertes Maß an Leistung nicht erbringen, unabhängig davon, ob sie prinzipiell zusammenwirken können oder nicht. Als Nullpunkt der technischen Kompatibilität wird die „absolute Inkompatibilität“ definiert, wenn Systeme nicht Zusammenwirken können oder im Zusammenwirken keinerlei Leistung erbringen.

Die Bedingungen der technischen Kompatibilität können sich über alle baulichen Komponenten von Fahrzeugen, die in irgendeiner Weise in die Interaktion von Fahrzeug und Strecke hineinspielen, erstrecken. Bei der Definition dieser Bedingungen nehmen die „Schienennetz-Nutzungsbedingungen“ der Infrastrukturbetreiber als die Zusammenführung von technischen Entwicklungen, gesetzlichen Vorgaben und infrastrukturbedingten Grenzwerten einen zentralen Platz ein. Exemplarisch können hier die „Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG“ [35] (SNB) herangezogen werden.

Aus dem sehr umfassenden Feld der SNB tritt für diese Arbeit die Richtlinie 810.0100 „Technischer Netzzugang für Fahrzeuge“ [32] mit ihrem Untermodul 810.0300 hervor, da hier die Zugangsbedingungen hinsichtlich der Zugbeeinflussungssysteme spezifiziert werden.

Für diesen Abschnitt bleiben jedoch vorerst zwei Faktoren der Diskussion der Zugangsvoraussetzungen festzuhalten: zum einen der Begriff der technischen Kompatibilität sowie zum anderen damit korrespondierend der mögliche Ausschluss von Fahrzeugen von einer betrachteten Infrastruktur.

Somit wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug, das die Zugangsvoraussetzungen verfehlt, als nicht kompatibel angesehen wird und vom Zugang zur betrachteten Infrastruktur ausgeschlossen bleibt. Dabei entfaltet dieser Ausschluss seine Wirkung im Modell auf der Ebene des einzelnen Streckenkilometers und des einzelnen Fahrzeugs.

Die Zugbeeinflussungssysteme als die zentralen Untersuchungsobjekte dieser Arbeit bilden als eine Dimension dieser Zugangsvoraussetzungen bei Inkompatibilität somit ebenfalls ein Ausschlusskriterium.



### 3.3. Zugbeeinflussungssysteme im Verständnis der Arbeit

In das Bild, das den Eisenbahnsektor aus der Potentialsicht betrachtet, werden im nächsten Schritt die Zugbeeinflussungssysteme integriert. Dabei bildet das Potentialdreieck aus Netz, Fuhrpark und Betriebsleistung inklusive der diskutierten Zugangsvoraussetzungen die Ausgangsbasis.

Das grundlegende Verständnis von Zugbeeinflussungssystemen für die Modellierung stützt sich auf die Definition von Pachl. Demnach sind Zugbeeinflussungssysteme „Anlagen, die Informationen über die zulässige Fahrweise vom Fahrweg zum Fahrzeug übertragen und bei Abweichungen von der zulässigen Fahrweise auf dem Fahrzeug entsprechende Schutzreaktionen [...] auslösen.“ [119, S. 70]

Damit ist ein Zugsicherungssystem als Teil des Regelkreises der Eisenbahnsicherungstechnik aufzufassen [103, S. 3], der die Sicherheitslücke schließt, die durch die Bedienung des Menschen prinzipiell entstehen kann.

In der Zusammenführung der bisherigen Erörterungen können Zugbeeinflussungssysteme, synonym in der Arbeit auch als Zugsicherungssysteme bezeichnet, als Investitionsgüter, Ausrüstungskomponenten oder Subsysteme der zweiteiligen Betriebsmittel, als zweiteiliger Systemverbund und hinsichtlich ihrer Funktion als Zugangsvoraussetzungen betrachtet werden.

Für die weitere Modellierung liegt der herausragende Aspekt der Zugbeeinflussungssysteme in der netzseitigen Definition von Zugangsvoraussetzungen für die Fahrzeuge bzw. Fahrzeugsysteme. Dieser Umstand soll kurz am Beispiel Deutschland dargestellt werden.

#### 3.3.1. Systematisierung der Zugbeeinflussungssysteme als Zugangsvoraussetzungen

Die Grundlage für die Definition von Zugsicherungssystemen als Zugangsvoraussetzungen bildet der § 4 AEG. Zum einen verpflichtet § 4 Abs. 1 Satz 2 AEG die Eisenbahnen zu einer sicheren Betriebsführung, zum anderen schreibt § 4 Abs. 3 AEG vor, dass der Infrastrukturbetreiber auch die Sicherungssysteme zu betreiben hat. [3]

Eine direkte Ausrüstungspflicht mit Zugbeeinflussungssystemen konstituiert, aufbauend auf dem § 4 AEG, der § 15 Abs. 2, 3 EBO sowie der § 28 Abs. 1 Pkt. 4, 5 EBO [40]. Hier werden geschwindigkeitsabhängig Funktionen vorgeschrieben, die Zugsicherungssysteme zu erfüllen haben. Die Geschwindigkeitsschwellen werden dabei auf 100 *km/h* sowie auf 160 *km/h* festgelegt. Bei dieser Definition von Zugangsvoraussetzungen werden jedoch keine Systeme oder Systemlösungen explizit vorgeschrieben.

Letztlich umgesetzt werden diese Zugangsforderungen in den „Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG“ [35], die, wie erwähnt, die Zugangsbedingungen für das Netz der DB Netz AG zusammenfassen und definieren.

Hierin, und in den weiterführenden Richtlinien 810.0100 [32] und 810.0300 [33] werden sowohl Zugsicherungssysteme allgemein als auch explizit das System „PZB90“ für (fast) das gesamte deutsche Streckennetz sowie das System „LZB“ für Teile des Netzes vorgeschrieben.

Das gesamteuropäische System ETCS stellt bis jetzt noch kein Netzzugangskriterium

dar. Der Webseite der Deutschen Bahn [37] zufolge wird dies voraussichtlich auch erst ab dem Jahr 2015 der Fall sein. Die dann geltenden Bedingungen werden in der Richtlinie 810.0300A03 „ETCS“ veröffentlicht.

Die weitere Spezifizierung der Zugbeeinflussungssysteme im Sinne der Modellierung richtet sich an diesen Zugangsbedingungen und der damit verbundenen „technischen Kompatibilität“ aus und führt drei Leistungsmerkmale zur Unterscheidung der Systeme ein. Dabei greifen die Merkmale auf die eingangs beschriebenen Dimensionen der Kategorisierung der Verkehrs- bzw. Betriebsleistung zurück. Bezugspunkt ist dabei immer die „Nicht-Ausstattung“ bzw. absolute Inkompatibilität der Fahrzeug- und der Streckensysteme, die den Nullpunkt der Leistung definiert.

Von den Dimensionen der Verkehrsleistung stehen die Geschwindigkeit, die Leistungsfähigkeit und die Sicherheit im Vordergrund. Hier wird davon ausgegangen, dass die ZBS ein Teilaspekt der „Produktion“ der jeweiligen Dimensionen darstellen, was im Folgenden kurz beleuchtet wird.

Prinzipiell wird die *Geschwindigkeit* nicht direkt von den ZBS beeinflusst, da Fahrzeuge unabhängig von der Systemausrüstung - schnell - fahren können. Wie bereits benannt, wird durch die gesetzlichen Festlegungen der EBO [40] die Überschreitung bestimmter Geschwindigkeiten jedoch zwingend mit Erfüllung bestimmter ZBS-Funktionalitäten verknüpft.

Somit sind für die Fahrzeug-Strecke-Interaktion ab 100 *km/h* Systeme zwingend erforderlich, mit denen ein Zug „selbsttätig zum Halten gebracht und ein unzulässiges Anfahren gegen Halt zeigende Signale selbsttätig verhindert werden kann.“<sup>15</sup> Ab 160 *km/h* muss ein Zug „außerdem geführt werden“<sup>16</sup> können.

Der Einfluss der ZBS auf die *Leistungsfähigkeit* einer Eisenbahnanlage, die damit als Leistungsmerkmal den ZBS selbst zugerechnet werden kann, spiegelt sich sowohl in der potentiell fahrbaren Geschwindigkeit als auch dem angewendeten Betriebsverfahren wider.

Beide Aspekte sind u.a. direkt abhängig von den eingesetzten Zugbeeinflussungssystemen [8] oder ziehen in umgekehrter Reihenfolge bestimmte Systemlösungen bzw. Funktionalitäten nach sich. [144]

Zu dieser Abhängigkeit zwischen ZBS und Leistungsfähigkeit tritt noch eine Dimension der Leistungsfähigkeit, die dem systemeigenen Aufbau und der Funktionsarchitektur entspringt [116]. Diese drei Bereiche zusammengekommen verdeutlichen, dass ein starker Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit einer Bahnanlage und der jeweiligen Ausrüstung mit Zugbeeinflussungssystemen angenommen werden kann.

Die dritte Dimension der Betriebsleistung, die maßgeblich durch die ZBS beeinflusst wird, ist die *Sicherheit*. [14]

Hierbei ist zum einen die Sicherheit zu nennen, die die Systeme durch ihre Funktionalität für den Betrieb garantieren. Wobei die Spannweite des Potentials der Systeme in dieser Dimension von der einfachen Überwachung gegen Überfahrung eines Halt-zeigenden Signals, also der einfachen Fahrsperrung, bis hin zur Überwachung kontinuierlicher, dyna-

---

<sup>15</sup>§ 15 Abs. 2 EBO [40]

<sup>16</sup>§ 15 Abs. 3 EBO [40]

mischer Geschwindigkeitskurven und Führerstandssignalisierung reicht.

Zum anderen ist im Zusammenhang mit der Sicherheit auch die Sicherheit der Systeme hinsichtlich von Ausfällen zu nennen. Dabei ist von Interesse, wie häufig diese Ausfälle auftreten, in welchem Umfang sie sich auf die Sicherheit des gesamten Betriebs auswirken und wie schnell sie entdeckt und behoben werden (können).

In der Zusammenschau der drei benannten Dimensionen lässt sich eine Leistungskategorisierung aufbauen, mit deren Hilfe die einzelnen Zugbeeinflussungssysteme bewertet werden können. Diese Bewertung findet immer vor dem Hintergrund der Zugangsvoraussetzungen statt, die entlang dieser Leistungskategorisierung Anforderungen definieren, so dass in der Gegenüberstellung von Leistungen und Forderungen der Begriff der „technischen Kompatibilität“ operationalisiert werden kann.

Im Verständnis der Arbeit gelten hierdurch ein Fahrzeug- und ein Streckensystem als kompatibel, wenn sie im Zusammenwirken in den drei oben beschriebenen Dimensionen der Betriebsleistung ein gefordertes Leistungslevel erreichen oder überschreiten. Als inkompatibel gelten somit Systeme, die entweder über keinen komplementären Gegenpart verfügen oder die in ihrer Leistung unter dem geforderten Level liegen.

Wie bereits angedeutet, ist diese Wirkung der Zugbeeinflussungssysteme analog zu den anderen Zugangsvoraussetzungen zu sehen, so dass Inkompatibilität der Systeme einen Ausschluss des betreffenden Fahrzeugs von dem jeweiligen Netzkilometer zur Folge hat.

Die Betrachtung der Zugbeeinflussungssysteme als „Black Box“, die an früherer Stelle eingeführt wurde, kann an dieser Stelle konkretisiert werden. Allgemein wird unter „Black Box“ eine Sichtweise verstanden, die „unter Abstraktion von der Struktur eines betrachteten Systems [die] Inputs [...] und Outputs [...] desselben beobachtet und zueinander in Beziehung [setzt]“. [138, S. 9]

Auf die Zugbeeinflussungssysteme übertragen, bedeutet dieser Blickwinkel, dass eine Unterscheidung der einzelnen Systeme lediglich entlang des Systemverbunds der kompatiblen Fahrzeug- und Streckensysteme sowie ihrer Leistung im oben entwickelten Verständnis vorgenommen wird. Damit wird diese Leistung in den verschiedenen Kategorien als der Output der Systeme betrachtet. Von der Struktur der einzelnen Systeme wird hinsichtlich ihrer technischen Realisierung, aber auch ihrer Entwicklung vollständig abstrahiert.

### 3.3.2. European Train Control System - ETCS

Trotz dieses Verständnisses von Zugbeeinflussungssystemen muss als Abbild der Realität eine große Vielzahl von Systemen berücksichtigt werden. Diese Vielzahl der untereinander zumeist inkompatiblen Systeme, die sich im Laufe der Zeit im jeweiligen nationalen Rahmen entwickelt haben, sind Ausdruck unterschiedlicher Sicherheitsphilosophien und technischer Entwicklungswege. Einen Einblick in die Vielfalt geben zum Beispiel die Entscheidung (ENT) 2006/679/EG<sup>17</sup> oder die Artikel von Pachl [118], [120] und Theeg/Vincze [147].

---

<sup>17</sup> Anhang B Teil 1 ENT 2006/679/EG [47]

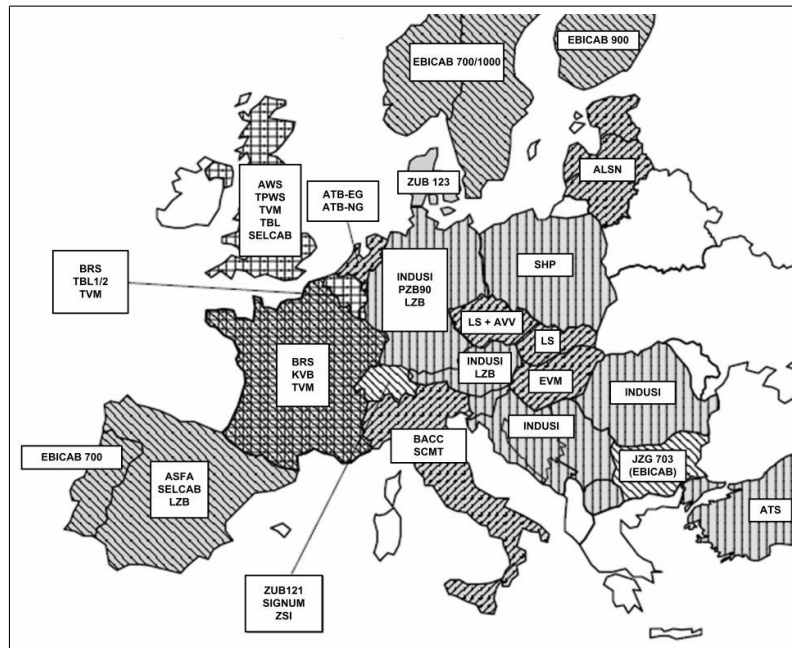


Abbildung 3.8.: Vielfalt der Zugbeeinflussungssysteme in Europa (Quelle: vgl. [156, S. 72])

### Einordnung und grundsätzlicher Aufbau von ETCS

Um den negativen Auswirkungen dieser Vielfalt, insbesondere den systembedingten Unterbrechungen von internationalen, innereuropäischen Transportketten entgegenzuwirken, ist in den letzten Jahrzehnten die Entwicklung eines gesamteuropäischen Zugbeeinflussungssystems, des „European Train Control Systems“ (ETCS), angestrebt worden.

Diese Entwicklung ist eine Facette der Bemühungen einer Harmonisierung des zersplitterten europäischen Eisenbahnsystems, die wiederum als Teilaspekt der Schaffung eines gesamteuropäischen Wirtschaftsraums gesehen werden kann. Diese Harmonisierung wurde 1991 unter dem Schlagwort der Interoperabilität, nach langer Passivität des Rates der Europäischen Gemeinschaften und nach einer durch das Europäische Parlament initiierten Untätigkeitsklage [54], mit der Richtlinie 91/440/EWG [55] begonnen.

Der Richtlinie 91/440/EWG [55] folgten eine ganze Reihe von Rechtsakten, die zum Ziel hatten und haben, einen interoperablen, gesamteuropäischen und wettbewerbsfähigen Eisenbahnverkehrsmarkt zu realisieren, wobei der freie Wettbewerb im Sinne des europäischen Binnenmarkts und der vier Grundfreiheiten<sup>18</sup> als Leitmotiv gelten kann. Herausragende Bedeutung kommt bei dieser Umgestaltung den drei so genannten „Eisenbahnpaketen“<sup>19</sup> zu, die jeweils mit einem Bündel von Richtlinien verschiedene Bereiche des Gesamtsystems adressieren. [68, S. 18]

<sup>18</sup>Freizügigkeit, Warenverkehrs-, Dienstleistungs-, Kapital- und Zahlungsverkehrsfreiheit [155]

<sup>19</sup>Erstes Paket: RL 2001/12/EG, RL 2001/13/EG, RL 2001/14/EG; Zweites Paket: RL 2004/49/EG, RL 2004/50/EG, RL 2004/51/EG, VO (EG) 881/2004; Drittes Paket: VO (EG) 1370/2007, VO (EG) 1371/2007, RL 2007/58/EG, RL 2007/59/EG

Als ein Aspekt der technischen Interoperabilität, die als „Voraussetzung für betriebliche Interoperabilität“<sup>20</sup> angesehen werden kann, wird seit Beginn der 1990er Jahre in der Gemeinschaft die Entwicklung eines Europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems ERTMS (European Rail Traffic Management System) betrieben. Dieses System besteht aus den beiden Basiskomponenten GSM-R und ETCS [51, S. 3] und wird durch die Verkehrssteuerungsebene ETML (European Traffic Management Layer) ergänzt. [50, S. 6]

GSM-R (Global System for Mobile Communications - Railway) ist ein Funkstandard für den Eisenbahnbereich, der auf den allgemeinen Mobilfunkstandard GSM aufbaut. Dabei wird GSM-R gesamteuropäisch vereinheitlicht für die datenbezogene Kommunikation zwischen Fahrzeug und Strecke verwendet [51, S. 4] und verwirklicht somit zumindest für ETCS Level 2 und 3 die grundlegende Informationsübertragung zwischen den Systemteilen. Für die Arbeit steht jedoch das gesamteuropäische Zugsicherungssystem „European Train Control System“ im Zentrum der Betrachtungen, so dass der Funkstandard GSM-R als gegeben vorausgesetzt und in der Modellierung nicht explizit berücksichtigt wird.

Der strukturelle Aufbau von ETCS ist im Rahmen dieser Arbeit, dem „Black Box“-Blickwinkel folgend, nur insoweit von Interesse, wie er funktionale Aspekte und Leistungsmerkmale determiniert, die wiederum zur Abgrenzung und Bewertung der einzelnen Varianten von ETCS und gegenüber sonstigen Systemen, im Sinne der oben dargestellten Unterscheidung von Zugbeeinflussungssystemen, herangezogen werden können.

Prinzipiell definieren die Entscheidungen 2006/860/EG<sup>21</sup> und 2006/679/EG<sup>22</sup> drei Level von ETCS, die unterschiedliche Anwendungs- und Leistungsstufen darstellen. Da jedoch alle Entwicklungen durch verschiedene Umstände auf die Level 1 und 2 fokussiert sind, bleibt das dritte Level im Weiteren unberücksichtigt.

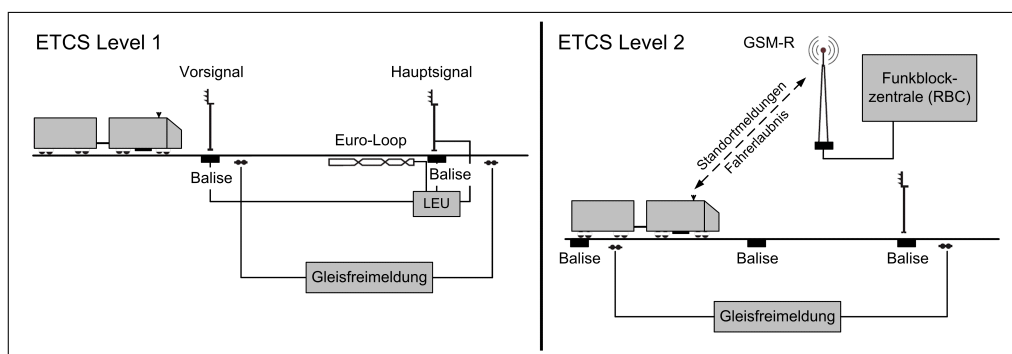


Abbildung 3.9.: Prinzipskizze ETCS Level 1 & 2 (Quelle: vgl. [118, S. 730])

Den prinzipiellen Aufbau der beiden verbleibenden Level zeigt die Abbildung 3.9. Dabei ist als zentraler Unterschied die Übertragung der Informationen vom Fahrweg zum Fahrzeug anzusehen.

Im Level 1 wird diese Übertragung - zumeist - punktförmig über Balisen realisiert, wohingegen im Level 2 eine kontinuierliche Übertragung mittels einer Funkverbindung

<sup>20</sup>Kapitel 2.2.1 ENT 2006/860/EG [48]

<sup>21</sup>Kapitel 2.2.3 ENT 2006/860/EG [48]

<sup>22</sup>Kapitel 2.2.3 ENT 2006/679/EG [47]

stattfindet. In der Folge kann beim Level 2 auf einen Großteil der streckenseitigen, sicherungstechnischen Installationen, u.a. auch die Signalisierung, verzichtet werden, was unter Umständen zu geringeren Kosten bei der Installation als auch Instandhaltung von ETCS-Level-2-Systemen führt. [119, S. 81ff.]

Zusätzlich kann durch die kontinuierliche Informationsübertragung von einer größeren Leistungsfähigkeit des Levels hinsichtlich der Kapazität der Bahnanlage als auch der Sicherheit ausgegangen werden. [150, S. 33ff.],[159, S. 679]

In der Realität hat sich, ungedeckt von den technischen Spezifikationen, eine weitere Anwendungsform von ETCS entwickelt, wobei jedoch kein eigenständiges neues Level konstituiert wird. Vielmehr hat sich eine weitere Betriebsart innerhalb von ETCS Level 1 etabliert, so dass zwischen ETCS Level 1 „Full Supervision“ (ETCS L1), das die herkömmlichen Level-1-Funktionalitäten umfasst und ETCS Level 1 „Limited Supervision“ (ETCS LS) unterschieden wird. [123, S. 690]

ETCS LS behält die grundlegenden Kommunikationswege und die zentralen Komponenten von ETCS L1 bei, beinhaltet aber ansonsten einen anderen, an die jeweiligen Bedingungen des Netzabschnittes angepassten, zumeist reduzierten Funktionsumfang.

Wie der Name „Limited Supervision“ andeutet, arbeitet das System mit Teilüberwachung, was bedeutet, dass der Triebfahrzeugführer nach den Vorgaben der ortsfesten Signalisierung fährt. Parallel wird die Dynamik des Zuges von dem System nur an definierten Stellen verdeckt überwacht. Der Abgriff der jeweils aktuellen Signalinformationen für diese Überwachung kann direkt am Signal geschehen, so dass keine zusätzliche Anbindung an das Stellwerk nötig ist. [122, S. 672]

Die Entwicklung von ETCS LS, die vornehmlich in der Schweiz durch die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) vorangetrieben wird, setzt damit auf der bestehenden Infrastruktur auf, so dass die Modernisierung von Stellwerken und anderen Sicherungsanlagen nicht zwingend erforderlich ist. [19, S. 6]

Hinsichtlich der Leistung entspricht das System den meisten punktförmigen Zugsicherungssystemen der europäischen Bahnen, wie zum Beispiel PZB oder ZUB. [143, S. 2]

Eine Besonderheit, die in der Schweiz im Zusammenhang mit der Betriebsart LS umgesetzt wird, stellt der Aufbau von nationalen Sicherungssystemen mit ETCS-Komponenten dar. Hierbei wird die Funktionalität des Balisentelegramms genutzt, um im Telegrammpaket „44“ landesspezifische Daten des nationalen Klasse-B-Systems zu übertragen. Damit wird es möglich, eine „Euro“-Version der Alttechnik zu realisieren, die parallel auf der selben Hardware ETCS LS, also interoperablen Betrieb, ermöglicht. [19, S. 6]

Durch diese stufenweise und parallele Migration und die Beibehaltung von alten Stellwerken und Sicherungsanlagen eröffnet die Betriebsart LS ein großes Potential für eine wirtschaftliche Migration von ETCS. Damit ist, obwohl ETCS Level 1 „Limited Supervision“ nicht Eingang in die aktuelle Version 2.3.0.d der „System Requirement Specification“ (SRS)<sup>23</sup> gefunden hat, diese Betriebsart in der Modellierung der Migrationsszenarien von Zugbeeinflussungssystemen auf jeden Fall zu berücksichtigen. [159, S. 680]

---

<sup>23</sup> Anhang A Z.4 ENT 2006/860/EG [48], Anhang A Z.4 ENT 2006/679/EG [47]

## Rechtlicher Rahmen von ETCS

Die rechtliche Entwicklung von ETCS ist im Weiteren zu betrachten, da hieraus eine zusätzliche Abgrenzung zu den nationalen Altsystemen abgeleitet werden kann und sich einige zentrale Aspekte der Migration von ETCS ergeben.

Als direkt für diese Entwicklung und Implementierung von ETCS bedeutsam sind die Richtlinien 96/48/EG [56] und 2001/16/EG [60] zu erachten. Aufbauend auf die Richtlinie 91/440/EWG [55] definieren sie die Anforderungen für die Herstellung der Interoperabilität des europäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems und des konventionellen Eisenbahnsystems. Dazu untergliedern sie das Gesamtsystem Eisenbahn in Teilsysteme, die jedes für sich genommen Ziel der Bemühungen zur Herstellung von Interoperabilität sind.<sup>24</sup>

Die „Bauteile, Bauteilgruppen, Unterbaugruppen oder komplette Materialbaugruppen, die in ein Teilsystem eingebaut sind oder eingebaut werden sollen und von denen die Interoperabilität des [...] transeuropäischen Eisenbahnsystems direkt oder indirekt abhängt“<sup>25</sup>, werden in den Richtlinien Interoperabilitätskomponenten genannt. Mit Bezug auf ETCS, das dem Teilsystem „Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung“<sup>26</sup> zuzurechnen ist, bilden die Interoperabilitätskomponenten die grundlegenden Systembausteine. In diesem auf ETCS bezogenen Verständnis wird die Bezeichnung „Interoperabilitätskomponente“ auch in der weiteren Modellierung verwendet.

Die Interoperabilitätskomponenten müssen von einer nationalen, unabhängigen Stelle einer Prüfung und Zertifizierung unterworfen werden, um nach dem Erhalt einer EG-Konformitätserklärung in den Verkehr gebracht werden zu dürfen.<sup>27</sup> Besteht diese EG-Konformitätserklärung innerhalb eines Mitgliedsstaates rechtmäßig, so müssen andere Mitgliedsstaaten diese Erklärung anerkennen und die Komponenten auch in ihrem Hoheitsgebiet zulassen. Dies führt schließlich zu einem gesamteuropäischen Markt für Interoperabilitätskomponenten und des Gesamtsystems ETCS.

Für die detaillierte Definition der grundlegenden Anforderungen und funktionalen Beziehungen der Interoperabilitätskomponenten entwickeln die Richtlinien 96/48/EG und 2001/16/EG das System der TSI (technische Spezifikationen für die Interoperabilität)<sup>28</sup>. Diese TSI werden mit den Entscheidungen 2006/860/EG [48], 2006/679/EG [47] und 2002/731/EG [46] konkretisiert und in geltendes Recht überführt. Die Entscheidung 2006/679/EG gilt für das konventionelle, transeuropäische Eisenbahnsystem und die Entscheidungen 2006/860/EG und 2002/731/EG gelten für das transeuropäische Hochgeschwindigkeitsbahnsystem. Wobei die Entscheidung 2006/860/EG die Entscheidung 2002/731/EG aufgehoben hat, so dass diese lediglich noch für Bestandsprojekte zur Anwendung kommt<sup>29</sup>.

Die endgültige Spezifikation der Leistungsmerkmale, der Schnittstellen und Funktionen von ETCS bzw. der einzelnen Interoperabilitätskomponenten erfolgt schließlich in weiter-

---

<sup>24</sup> Art. 2 Abs. c RL 96/48/EG [56], Art. 2 Abs. c RL 2001/16/EG [60]

<sup>25</sup> Art. 2 Abs. d RL 96/48/EG [56], Art. 2 Abs. d RL 2001/16/EG [60]

<sup>26</sup> ENT 2006/860/EG [48], ENT 2006/679/EG [47], ENT 2002/731/EG [46]

<sup>27</sup> Art. 10 Abs. 2 RL 96/48/EG [56], Art. 10 Abs. 2 RL 2001/16/EG [60]

<sup>28</sup> Art. 2 Abs. g RL 96/48/EG [56], Art. 2 Abs. g RL 2001/16/EG [60]

<sup>29</sup> Art. 6 ENT 2006/860/EG [48]

führenden Unterlagen, den „Subsets“, die im Anhang der beiden gültigen Entscheidungen referenziert sind.<sup>30</sup>

Diese Spezifikationen, in der SRS festgehalten, durch die UNISIG-Arbeitsgruppe (Union Industry of Signaling) der UNIFE (Union des Industries Ferroviaires Europeennes - Verband der europäischen Eisenbahn-Industrie) erarbeitet, bilden die Grundlage für die Entwicklung der eigentlichen Systeme und Subsysteme durch die Industrie. In deutsches Recht werden die Richtlinie 96/48/EG [56] und 2001/16/EG [60] schließlich durch die "Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung" [148] integriert.

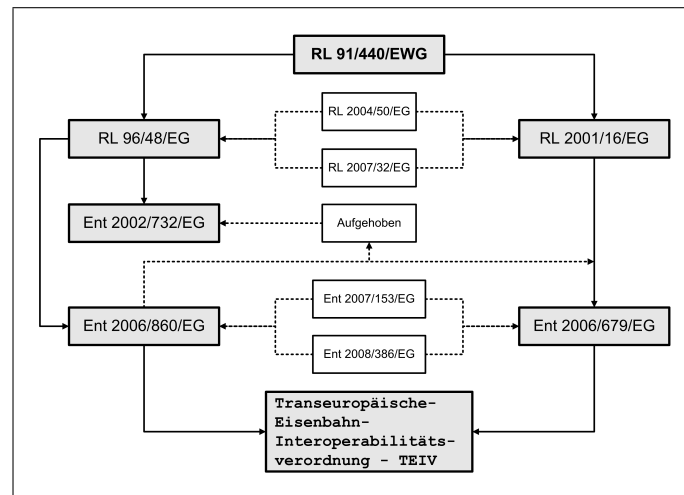


Abbildung 3.10.: Grundlegende Rechtsdokumente für ETCS

Einen vereinfachten Überblick über die ETCS zugrunde liegenden Rechtsdokumente zeigt die Abbildung 3.10. Ein detaillierter Einblick ist u.a. in der Studie „Rail Interoperability and Safety“ [52] zu finden.

Letztlich bleibt festzuhalten, dass für die Definition von ETCS die Entscheidungen 2006/860/EG [48] und 2006/679/EG [47] die zentralen Dokumente darstellen. Diese Definition grenzt ETCS nach funktionalen Gesichtspunkten als „Klasse-A-System“ gegen die nationalen Altsysteme („Klasse-B-Systeme“) ab und räumt dem europäischen System weitestgehenden Vorrang bei der Implementierung im europäischen Eisenbahnsystem ein.<sup>31</sup>

Im Zuge dieser Unterteilung wird den Mitgliedstaaten die Weiterentwicklung bzw. Pflege der alten Klasse-B-Systeme gestattet, soweit dies für die Aufrechterhaltung der Sicherheit und den Bestandsschutz dringend nötig ist und die Migration des Klasse-A-Systems nicht beeinträchtigt. Auch ist es grundsätzlich erlaubt, Klasse-B-Systeme und Klasse-A-Systeme parallel zu betreiben.<sup>32</sup>

Die sprachliche und funktionale Abgrenzung zwischen ETCS und nationalen Systemen mittels der Unterscheidung in Klasse-A- und Klasse-B-Systeme wird auch für die weitere Modellierung genutzt.

<sup>30</sup>Anhang A ENT 2006/679/EG [47], Anhang A ENT 2006/860/EG [48]

<sup>31</sup>Kapitel 2.2.2 ENT 2006/860/EG [48], Anhang Kapitel 2.2.2 ENT 2006/679/EG [47]

<sup>32</sup>Kapitel 7.2.3 ENT 2006/860/EG [48], Anhang Kapitel 7.2.3.1 ENT 2006/679/EG [47]



### Migrationsbestrebungen von ETCS

Für die schnelle Migration von ETCS hat die Kommission auf europäischer Ebene mehrere Instrumentarien implementiert. Mit den Entscheidungen 2006/860/EG [48] und 2006/679/EG [47] hat sie eine Ausrüstungspflicht für Neubauten und signifikante Änderungen an den bestehenden Sicherungssystemen für das HGV- als auch das konventionelle Eisenbahnsystem auf der Netzseite konstituiert. Hinzu treten eine Ausrüstungspflicht für Projekte, die in signifikantem Umfang mit Mitteln der Gemeinschaft gefördert wurden, sowie eine allgemeine Pflicht zur Vorrüstung.

Zusätzlich besteht bei einer Fahrzeugumrüstung, die im Investitionsumfang das 10-fache einer ETCS-Ausrüstung übersteigt, ebenfalls eine Pflicht zur Implementierung von ETCS.<sup>33</sup>

Weiterhin hat die Kommission ein „ETCS-Netz“ innerhalb der europäischen Infrastruktur definiert, das eine herausragende Stellung in der Implementierung von ETCS erhält.<sup>34</sup> Für dieses Netz sind die Mitgliedstaaten aufgefordert, nationale „ERTMS-Umsetzungspläne“ zu definieren, die dann wiederum in einen gesamteuropäischen „Masterplan“ integriert werden. Die Abbildung 3.11 aus der betreffenden Entscheidung verdeutlicht dieses Vorgehen.<sup>35</sup>

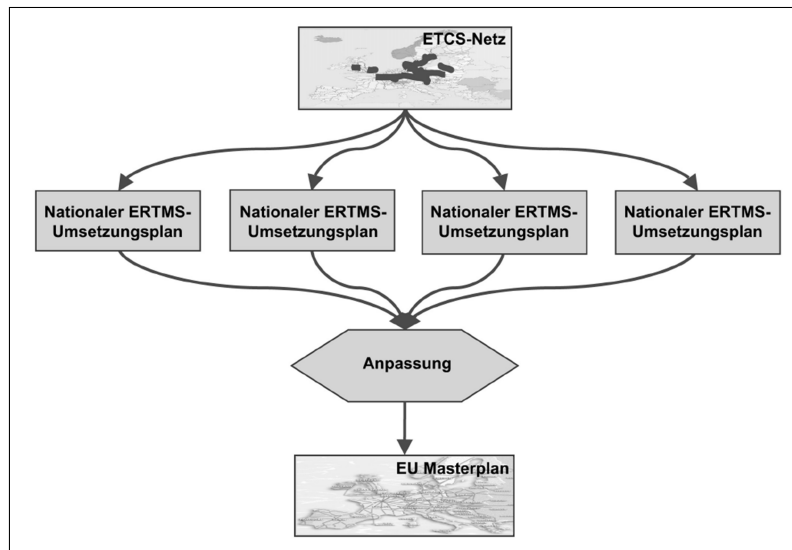


Abbildung 3.11.: Zusammenführung nationaler Migrationspläne (Quelle: vgl. [47, S. 79])

Innerhalb des ETCS-Netzes ist außerdem ein „Einführungskern“ eingegrenzt, der vorrangige Projekte gemäß der Entscheidung 1692/96/EG [57] zum Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes definiert. Für diese Projekte ist die ETCS-Ausrüstung verbindlich vorgeschrieben.<sup>36</sup> Dies führt schließlich zu dem von der Kommission geförderten

<sup>33</sup>Anhang Kapitel 7.2.2.5. ENT 2006/679/EG [47]

<sup>34</sup>Anhang H ENT 2006/860/EG [48], Anhang Kapitel 7.2.2.4.2. ENT 2006/679/EG [47]

<sup>35</sup>Anhang Kapitel 7.2.2.6. ENT 2006/679/EG [47]

<sup>36</sup>Anhang Kapitel 7.2.2.4.3. Abs. 2 ENT 2006/679/EG [47]

Korridorkonzept, bei dem jedes Projekt dieses Einführungskerns als Korridor über nationale Grenzen hinweg hinsichtlich der Migration von ETCS untersucht, projiziert und beschleunigt umgesetzt wird. [89, Abs. 12]

Auch wenn vor dem Hintergrund der netzbezogenen Maßnahmen die Fahrzeugseite scheinbar weniger Beachtung seitens der internationalen und nationalen Akteure erfährt, muss abschließend betont werden, dass die Entscheidung 2006/679/EG im Kapitel 7.2.2.4.3. Abschnitt 5 [47] explizit darauf hinweist, dass bei der Migration beide Seiten des Systemverbunds Eisenbahn, Fuhrpark und Infrastruktur, zu beachten sind.

Zusammenfassend für die Arbeit bleibt festzuhalten, dass es eine starke Beeinflussung der Migration von Zugbeeinflussungssystemen allgemein und insbesondere von ETCS durch strategische Instrumentarien seitens nationaler und internationaler Akteure gibt. Diese Instrumentarien können unter den Stichwörtern „Fördern“, „Fordern“ und „direkte Umrüstung“ subsumiert werden. Entlang dieser drei Schlagworte werden die strategischen Beeinflussungen der Migration für die vorliegende Arbeit und die weitere Modellierung operationalisiert und letztlich der Simulation zugänglich gemacht.

### 3.3.3. Integration der Zugbeeinflussungssysteme in das Modellbild

Abgesehen von ETCS als internationales System, das explizit in der Modellierung berücksichtigt wird, handelt es sich bei allen Klasse-B-Systemen um nationale Systeme. Da auch die Modellierung auf nationaler Ebene ansetzt, aber dennoch auf verschiedene, nationale Eisenbahnsysteme anwendbar sein soll, kann im Vorhinein keine Festlegung der Abbildung auf bestimmte Systeme erfolgen. Lediglich die Anzahl der Systeme auf Fahrzeug- bzw. Netzseite, die in einer Modellierung abgebildet werden können, ist mit neun Fahrzeugsystemen und sieben Netzsystemen fest definiert.

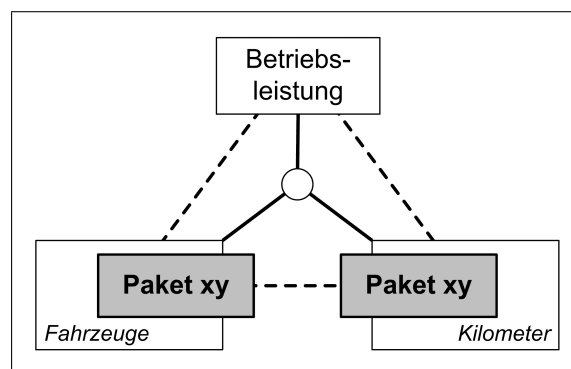


Abbildung 3.12.: Systemebene des Potentialdreiecks

Da mehrere Zugsicherungssysteme sowohl in Fahrzeugen als auch auf der Strecke parallel in verschiedenen Kombinationen auftreten können [118, S. 725f.] und diese Mehrfach-ausrüstungen gerade im Hinblick auf die Migration von ETCS an Bedeutung gewinnen<sup>37</sup>,

<sup>37</sup> Anhang Kapitel 7.2.3.1. Abs. 3 Anstr. 4 ENT 2006/679/EG [47]

werden im Modell diese Systemausrüstungen nicht als Einzelsysteme, sondern als eindeutige, unikale Systempakete den einzelnen Betriebsmitteleinheiten im Netz und Fuhrpark zugeordnet.

Dies trägt auch den Aussagen aus Kapitel 2.2.2 Rechnung, die das grundsätzliche Ziel der Modellierung in der Abbildung einer Investitionsentscheidung im Sinne einer Wahlentscheidung definieren und damit echte, sich ausschließende Investitionsalternativen voraussetzen.

Bei der Definition der Systempakete wird von einer freien Kombinierbarkeit der einzelnen Systeme ausgegangen, was zu einer sehr hohen Anzahl von möglichen Systemkombinationen und damit auch Systempaketen führt. Für die Definition einzelner Simulationsszenarien ist es jedoch möglich, bestimmte Systeme oder Systemkombinationen auszuschließen, so dass sich die Anzahl der Pakete in der konkreten Anwendung des Modells reduziert.

Die Integration dieser Systempakete in das Potentialdreieck der Betriebsleistung vollzieht sich in drei Schritten. Im ersten Schritt werden die Systempakete den einzelnen Betriebsmitteleinheiten, den Fahrzeugen und Netzkilometern, als Ausstattungsmerkmal zugeordnet. Dadurch wird aus dem einfachen ein integriertes Potentialdreieck mit einer zusätzlichen Systemebene, wie Abbildung 3.12 darstellt.

Im zweiten Schritt werden für alle möglichen Kombinationen zwischen Fahrzeug- und Netzsystemen die erreichbaren Leistungslevel in den drei Dimensionen der entworfenen Leistungskategorisierung definiert. Dabei gilt für einen Systemverbund aus Systempaketen das jeweils höchste Leistungslevel der einzelnen Systeme, die in das Paket integriert sind.

Als Gegenpart hierzu werden im dritten Schritt je Transport- und je Netzkategorie die geforderten Leistungslevel definiert. Im Zusammenspiel zwischen den Ausrüstungen, den erreichbaren und den geforderten Leistungslevel definiert sich schließlich eine „technische Kompatibilität“, die als Zugangsvoraussetzung eine Metaebene in das Potentialdreieck integriert, Abbildung 3.13.

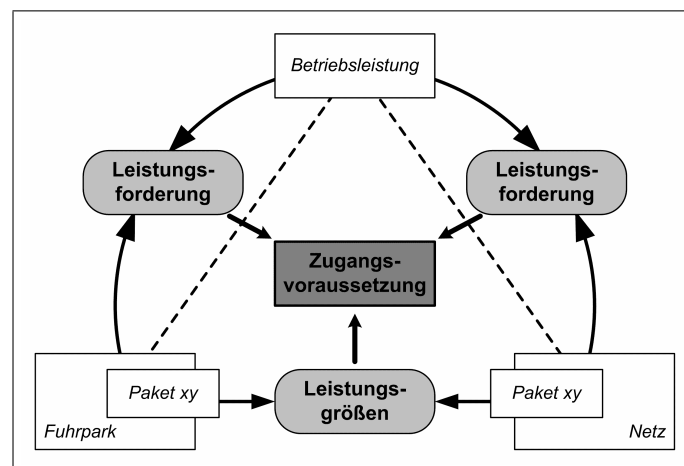


Abbildung 3.13.: Metaebene des Potentialdreiecks

Bei der Modellierung wird explizit zwischen Forderungen der Fahrzeug- und der Streckenseite unterschieden, wobei auf der Fahrzeugseite Maximalforderungen festgelegt werden. Auf der Streckenseite kann von diesen Forderungen nach unten abgewichen werden und somit innerhalb einer Netzkategorie zwischen verschiedenen Kategorien der Verkehrsleistung unterschieden werden. Dies ermöglicht ein heterogenes Bild der Verkehrsleistung innerhalb der prinzipiell homogenen Netzkategorien.

Letztlich lässt sich zusammenfassen, dass das eingangs entwickelte Potentialdreieck der Betriebsleistung um die Dimension der Zugbeeinflussungssysteme erweitert wird. Dabei bilden die Zugsicherungssysteme die zentrale Zugangsvoraussetzung und definieren für die Modellsicht die Zugänglichkeit eines Infrastrukturelementes für ein Fahrzeug. Hierdurch entsteht das integrierte Potentialdreieck, das als Systemebene in der Abbildung 3.12 zum Ausdruck kommt und das als Modell des Systems Eisenbahn der weiteren Modellierung zugrunde liegt.

### 3.4. Entwicklung des ausrüstungsabhängigen Kapitalwertes

Im Folgenden gilt es nun die Überlegungen aus den vorangegangenen Abschnitten zusammenzuführen, um die Adoption eines Zugbeeinflussungssystems, das im integrierten Potentialdreieck einen Teil der Betriebsmittel im Verkehrsmarkt des schienengebundenen Verkehrs darstellt, als explizite Investitionsentscheidung abzubilden.

Die weitere Entwicklung wird auf die Umsetzung der Kapitalwertmethode fokussiert. Dabei stellt sie die Konkretisierung des Investitionsentscheidungsprozesses sowie dessen eigentlichen Kern dar. Für die Modellierung werden im Folgenden die Zahlungsströme, Auszahlungen und Einzahlungen, der Investitionsalternativen entwickelt und in der Investitionsrechnung verdichtet.

Die Auszahlungen spiegeln das Verhältnis des Verkehrsbetriebs als Nachfrager zum Markt für Zugbeeinflussungssysteme wider. Wohingegen die Einzahlungen im Zusammenhang mit dem Markt für Verkehrsdienstleistungen und mit der Stellung des Verkehrsbetriebs als Anbieter auf diesem Markt zu sehen sind.

Beide Seiten müssen im Folgenden den Grundsätzen der Kapitalwertmethode entsprechend entwickelt und in das Modell integriert werden, so dass „die Auswirkungen einer Investitionsentscheidung über den gesamten Investitionszeitraum  $t_0$  bis  $t_n$ “ [160, S. 754] erfasst und bewertet werden.

Diese Abbildung des gesamten Investitionszeitraums impliziert, dass vom Zeitpunkt  $t_0$  ausgehend, der die Gegenwart und den Zeitpunkt der Investition in der Simulation widerspiegelt, bis zum Endpunkt des Zeitraums Prognosen für die ausschlaggebenden Größen vorgenommen werden müssen. Dabei lässt sich vorwegnehmen, dass die beiden zentralen Einflussgrößen auf der einen Seite die Verbreitung der einzelnen Zugbeeinflussungssysteme sowie auf der anderen Seite die ausrüstungsabhängige Betriebsleistung einer einzelnen Betriebsmitteleinheit sind.

Diese beiden Größen werden im Modell zum Zeitpunkt  $t_0$  aus dem aktuellen Zustand der Gesamtheit der Betriebsmittel berechnet. Die Prognose bis zum Investitionshorizont  $t_n$  kann dann durch zwei verschiedene Verfahren vorgenommen werden: zum einen auf

der Basis einer bivariaten linearen Regressionsanalyse der bis dahin vergangenen Daten oder zum anderen durch die naive Fortschreibung des jeweils berechneten Wertes.

Beim ersten Verfahren wird aus den relevanten Zeitreihen der vorangegangenen Daten und dem aktuellen Wert eine lineare Regressionsfunktion abgeleitet, die wiederum als Grundlage für die Prognose dient [41, S. 89f.]. Dahingegen wird bei der Fortschreibung der aktuell berechnete Wert für alle Zeitperioden über den gesamten Prognosezeitraum hinweg angenommen und fortgeschrieben. [106, S. 207]

Bei der Auswahl der Prognoseverfahren muss der Benutzer sich bewusst sein, dass beide Verfahren lediglich Annahmen darstellen und Vor- und Nachteile beinhalten.

So hat die Regressionsanalyse als autoregressives Verfahren den Vorteil, dass explizit Erwartungen über zukünftige Entwicklungen abgebildet werden, die sich durch Entwicklungen der Vergangenheit aufbauen, da die Prognose aus den Vergangenheitsdaten abgeleitet wird. Jedoch gerade in den Anfangsperioden einer Simulation oder bei einmaligen oder temporären Veränderungen kann eine derartige Berücksichtigung vergangener Entwicklungen die Berechnung verzerren und zu unplausiblen Simulationsergebnissen führen.

Als Beispiel sei hier die Ausrüstung eines begrenzten Streckenabschnittes mit einem neuen System zu Test- und Demonstrationszwecken genannt. Simulationsuntersuchungen mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modell haben gezeigt, dass unter der Benutzung der Regressionsanalyse als Prognoseverfahren diese einmalige, temporäre Umrüstung zur Vollausrüstung des gesamten Eisenbahnsystems mit dem neuen Zugbeeinflussungssystem führen kann.

Diese Entwicklung, die in der Annahme der Regressionsanalyse, dass weitere Umrüstungen folgen würden, systematisch angelegt ist, kann aber, wie z.B. die Erfahrungen mit der deutschen ETCS-Erprobungsstrecke „Jüterbog - Bitterfeld“ und dem weiteren Verlauf der ETCS-Ausrüstung in Deutschland zeigen, nicht immer vorausgesetzt werden. [95]

Das Verfahren der einfachen, naiven Fortschreibung des letzten Wertes ( $p_{t+1} = y_t$ ) hat genau den entgegengesetzten Nachteil, nämlich dass es keinerlei Vergangenheitsbezug aufweist bzw. in die Zukunft prognostiziert, so dass es aber auch innerhalb eines Szenarios nicht zu überoptimistischen Verlaufsannahmen kommen kann.

Welches Verfahren der Nutzer letztlich für seine Simulationsuntersuchungen anwendet, muss er vor dem Hintergrund der Aufgaben und fallbezogenen Gegebenheiten entscheiden. Die Grundlagen für beide Prognoseverfahren bilden jedoch die folgenden Ansätze der Berechnung der Aus- und Einzahlung bezüglich der Investitionsalternativen, die letztlich im Kapitalwert zusammengeführt werden.

### 3.4.1. Auszahlungen

Für eine Investition definiert Wöhe zwei Arten von Auszahlungen, die für die folgende Modellierung ausschlaggebend sind. Dabei wird die Differenzierung entlang der Zeitachse einer Investition vorgenommen. Am Anfang des Investitionszeitraums in  $t_0$  fallen die „Anschaffungsauszahlungen“ sowie in den anschließenden Perioden der Nutzung die periodischen Auszahlungen an. [160, S. 754]

Am Ende des Nutzungszeitraums einer Investition in  $t_n$  sieht Wöhe lediglich „Liquidationserlöse“, somit Einzahlungen, die einer Investition zuzurechnen sind [160, S. 754]. Für die Modellierung muss dagegen Beachtung finden, dass am Ende des Nutzungszeitraums erfahrungsgemäß Auszahlungen für die Entsorgung der Systeme, also „Entsorgungsauszahlungen“, einkalkuliert werden müssen.

Die folgende Entwicklung der Auszahlungen einer Investition, die in die Berechnung des Kapitalwertes einfließen, konkretisiert sich somit entlang der Nutzungsdauer einer Investition in drei Stufen an den Anschaffungsauszahlungen, den periodischen Auszahlungen und den Entsorgungsauszahlungen.

### **Anschaffungsauszahlungen**

Zu Beginn der Diskussion der Anschaffungsauszahlungen, die zum Zeitpunkt  $t_0$  der Investition anfallen, ist festzuhalten, dass in diesem Kontext der Verkehrsbetrieb als Nachfrager am Markt für Zugbeeinflussungssysteme auftritt. Dabei werden die Anschaffungsauszahlungen durch die Systempreise, also die Preise der einzelnen Systeme, die sich in diesem Markt etablieren, determiniert. Diese Preise werden im Weiteren als Preise einer vollständigen, betriebsfertigen Ausrüstung einer Betriebsmitteleinheit angesehen.

Für die Modellierung wird für jede Produktform ein eigener Markt angenommen, auf dem sich die Anbieter und die Nachfrager gegenüberstehen und sich ein Marktpreis einstellt. Damit setzt sich der Gesamtmarkt für Zugbeeinflussungssysteme aus mehreren parallelen Märkten je Produktform zusammen.

In der Entwicklung der Systempreise je Produktform wird unterstellt, dass diese an die jeweils aktuelle Verbreitung der zugrunde liegenden Systeme gekoppelt sind. Um diese dynamische Preisentwicklung zu veranschaulichen, wird im Folgenden in einem ersten Schritt der relevante Markt charakterisiert sowie dann in einem zweiten Schritt die Entwicklung der Stückkosten der Anbieter als zentrale Determinante umschrieben.

Im ersten Schritt können der gesamte ZBS-Markt, ebenso wie die parallelen Teilmärkte der Produktformen auf europäischer Ebene, als bilaterale Oligopole bezeichnet werden, auf denen sich „wenige, mittelgroße“ Anbieter und Nachfrager gegenüberstehen. [160, S. 634]

Diese Marktkonstellation eines Oligopols ist das Ergebnis einer Entwicklung, die in den 90er Jahren des vorigen Jahrhunderts begonnen hat. Damals war der Markt durch nationale, bilaterale Monopole geprägt, die sich zwischen den staatlichen Bahnunternehmen und der nationalen Bahnindustrie herausgebildet hatten. Glatz spricht, exemplarisch in dem Beispiel Österreich, von einem System des „Hoflieferanten“, das durch protektionistisches Beschaffungsverhalten sowie durch nationale Normen und Spezifikationen geschaffen wurde [70, S. 46].

Im Zuge der „Liberalisierung und Internationalisierung“ des Eisenbahnsektors in den letzten Jahrzehnten, getrieben durch die Deregulierungen seitens der Europäischen Union (siehe auch Kapitel 3.3.2), haben sich einige wenige, große Systemanbieter etabliert, die nunmehr international, insbesondere gesamteuropäisch, agieren. [137, S. 160]

Parallel zu dieser Konsolidierung und Internationalisierung der Wettbewerber sind auch die Auftraggeber, insbesondere die größtenteils in öffentlichem Eigentum befindli-

chen Infrastrukturbetreiber, als Nachfrager in der Beschaffungspolitik zu internationalen Ausschreibungen bzw. zur internationalen Auftragsvergabe übergegangen. Flankiert wird diese Entwicklung durch Europarecht, wie zum Beispiel die Richtlinie 2004/18/EG über die Vergabe von öffentlichen Aufträgen, die, unter Verweise auf die vier Grundfreiheiten, u.a. Diskriminierungsfreiheit und Transparenz vorschreibt.<sup>38</sup>

Eine Studie charakterisiert den jetzigen Markt der Bahntechnik als einen „Spezialmarkt“ mit „sehr hohen Eintrittsbarrieren“, mit vier etablierten Unternehmen sowie weiteren Nischenanbietern [94, S. 30, 57]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass letztlich ein Oligopolmarkt für Zugbeeinflussungssysteme auf europäischer Ebene entstanden ist.

Speziell für Schienenfahrzeuge untermauert Schubert diese Bewertung und bezeichnet den Markt der Fahrzeugs subsysteme, zu denen auch die Zugbeeinflussungssysteme zu zählen sind, als einen Markt im „bilateralen Oligopol“. [137, S. 38]

Neben die europaweite Öffnung der Beschaffungsmärkte tritt die Standardisierung der Systeme, der Komponenten und der Schnittstellen sowie die Offenlegung dieser Standards. Insbesondere für ETCS, das über die Interoperabilitätskomponenten und europäischen Konformitätserklärungen sehr stark standardisiert ist, kann dieser Aspekt hervorgehoben werden.<sup>39</sup>

Diese Standardisierung, also die Etablierung eines Marktstandards, schafft eine starke Ähnlichkeit zwischen den Produkten der einzelnen Anbieter, „da sie sich [...] an den verbindlichen Standards orientieren [...]“ müssen [99, S. 44]. Dies gilt speziell in den separaten Teilmärkten der einzelnen Produktformen.

Hierdurch sind die Angebote der einzelnen Anbieter als homogen zu betrachten, was bedeutet, dass die Nachfrager „keine sachlichen [...] Präferenzen für das Angebot eines Unternehmens“ haben [125, S. 72]. Weiterhin werden zeitliche oder örtliche Präferenzen ausgeschlossen, so dass letztendlich der Preis die alleinige Entscheidungsvariable bleibt.

Zusammenfassend handelt es sich somit bei den ZBS-Märkten um bilaterale Oligopole mit homogenen Produktstrukturen.

Da alle Akteure auf diesen Märkten institutioneller Natur sind, werden diese Strukturen von einer sehr hohen Markttransparenz flankiert, die bewirkt, dass angenommen werden kann, dass alle Akteure vollkommen informiert sind. [160, S. 632]

Unter Zugrundelegung dieser Konstellationen kann ein hoher Wettbewerbsdruck innerhalb der Märkte angenommen werden. Zusätzlich wird dieser Wettbewerb durch das Nebeneinander der Teilmärkte der einzelnen Produktformen verstärkt, da diese partiell als Substitute auf parallelen Märkten auftreten bzw. nachgefragt werden können.

Da infolge der Standardisierung durch das Vorhandensein von homogenen Produktformen kein Wettbewerb über Produktdifferenzierungen und durch die preisunabhängige Vorgabe der Absatzmengen seitens der Nachfrager kein Mengenwettbewerb stattfinden kann, ist von einem Preiswettbewerb auszugehen. Hierzu betont auch Linde, dass anschließend an die Festlegung von Marktstandards ein „Preiswettbewerb um Marktanteile mit starker Konkurrenz [...] wahrscheinlich [ist].“ [99, S. 44]

---

<sup>38</sup> Art. 2 RL 2004/18/EG [59]

<sup>39</sup> Anhang E ENT 2006/679/EG [47]

Sieht man von der Möglichkeit der Kartellbildung oder sonstiger Preisabsprachen zwischen den Unternehmen ab, etabliert sich durch den Preiswettbewerb auf oligopolistischen, homogenen Märkten „immer nur ein Preis [...] als Marktpreis“. [125, S. 72]

Schmidt drückt dies so aus: In einem derartigen Wettbewerb „ist der durch den Wettbewerb ausgeübte, von den Beteiligten unkontrollierbare Druck auf Preise und Kosten und damit auf die Gewinne, der durch das Gewinn- und Erfolgsstreben der Wirtschaftssubjekte ausgelöst wird [...]“, maßgeblich. [133, S. 62]

Anhand des „Bertrand-Nash-Gleichgewichts“ für ein homogenes Duopol fasst Pfähler diesen Sachverhalt zusammen. „Obwohl nur zwei (bzw. wenige) Unternehmen am Markt sind, führt der Preiswettbewerb bei identischen Grenz- bzw. Stückkosten zu einer gewinnlosen Produktion.“ Als zentrale Begründung nennt er dafür den Anreiz der Unternehmen, „den Konkurrenzpreis zu unterbieten, solange sie damit nicht unter die eigenen Durchschnittskosten“ fallen. [125, S. 77f.]

Für den betrachteten ZBS-Markt kann schließlich festgehalten werden, dass sich langfristig ein einheitlicher Systempreis je Produktform etabliert, der sich an den Stückkosten der Anbieter orientiert. Außerdem konstituiert sich eine einheitliche Stückkostenfunktion aller Anbieter, so dass das Anbieterfeld nicht differenziert betrachtet werden muss.

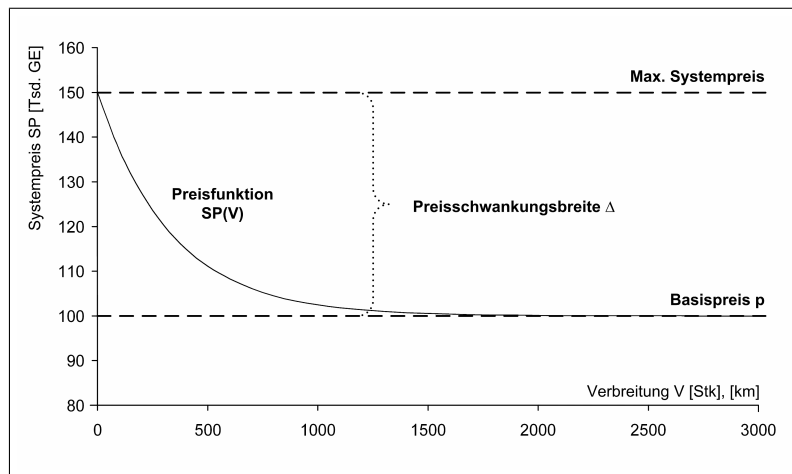


Abbildung 3.14.: Fiktive, dynamische Preisfunktion eines Systems

Um die Dynamisierung der Systempreise zu entwickeln, wird im zweiten Schritt angenommen, dass die Entwicklung der Stückkosten, dem Konzept der „Economies of Scale“ folgend, an die Verbreitung der Systeme gekoppelt ist.

Lüpschen definiert hierzu, dass „Economies of Scale“ vorliegen, „wenn eine Steigerung der Ausbringungsmenge eines Produktes zur Abnahme der (Herstell-)Stückkosten dieses Produktes führt.“ [101, S. 9]

Als ursächlich können für die „Economies of Scale“, wiederum Lüpschen folgend, drei „technische Ursachen“ angeführt werden. Zum Ersten die Verteilung der fixen Kosten auf eine steigende Ausbringungsmenge oder zum Zweiten die langfristige Anpassung der Kostenstruktur. Beide Aspekte können als statische Effekte bezeichnet werden. Zum Dritten



sind Erfahrungskurveneffekte sowie eine verbesserte Arbeitsorganisation zu nennen, die Lüpschen als dynamische Effekte klassifiziert. [101, S. 9]

Da diese Effekte, insbesondere die Fixkostendegression, aufgrund der hohen anfänglichen Kosten für Forschung und Entwicklung sowie die Erfahrungskurveneffekte und verbesserte Arbeitsorganisation im Projektgeschäft auch für die Anbieter von Zugbeeinflussungssystemen angenommen werden, können „Economies of Scale“ in der Herstellung von Zugbeeinflussungssystemen unterstellt werden.

Im Unterschied zur kumulierten Ausbringungsmenge, die den „Economies of Scale“ ursprünglich zugrunde liegt, wird für die Modellierung jedoch die Menge der zum Zeitpunkt installierten Systeme, somit die temporäre Verbreitung, als ausschlaggebend erachtet. Damit wird im Unterschied zur Ausbringungsmenge auch ein Rückgang der Verbreitung von Systemen betrachtet.

Begründungen hierfür können aus den sehr langen Lebenszyklen der Systeme abgeleitet werden. Zum einen kann bei zurückgehender Verbreitung der Erfahrungs- und Lernkurve eine „Vergessenskurve“ entgegengestellt werden [71, S. 93f.]. Zum anderen bieten die langen Lebenszyklen hinreichend Zeit, die Produktionskapazitäten an die sinkende Verbreitung anzupassen, was wiederum die Rationalisierungspotentiale umkehrt oder zumindest aussetzt.

Als Auswirkung der Berücksichtigung der aktuell installierten Systemmenge anstatt der kumulierten Ausbringungsmenge ist hervorzuheben, dass es mit abnehmender Verbreitung auch zu einer Kostenprogression, somit einem Anstieg der potentiellen Anschaffungsauszahlungen für das betroffene System kommen kann. Festzuhalten bleibt die dynamische Entwicklung der Stückkosten für Zugbeeinflussungssysteme in Kopplung an deren temporäre Verbreitung.

Der im ersten Schritt dargestellte Wettbewerbsdruck bewirkt schließlich, dass diese dynamischen Stückkosten als Systempreise an die Nachfrager weitergegeben werden. Damit wird auch die Systempreis-Funktion für die Zugbeeinflussungssysteme abhängig von der Verbreitung der Systeme.

Dass diese Effekte, die für die Modellierung unterstellt werden, auch auf dem realen Markt für Zugbeeinflussungssysteme wirken, lässt sich am Beispiel des Verhaltens der Schweizerischen Eidgenossenschaft im Zuge der ETCS-Migration ablesen. So wird für die ersten Fahrzeugsysteme ein Preis von rund 600.000 Schweizer Franken pro ETCS-Ausrüstung angenommen. Dahingegen wird als späterer Marktpreis, der sich bei etablierter ETCS-Technik bildet, lediglich rund 300.000 Schweizer Franken unterstellt. Die Differenz wird als „außerordentlicher Aufwand“ verstanden und vom Schweizer Staat als „Anschubaufwand“ übernommen. [19, S. 15]

Mathematisch wird für die Systemvariante  $i$  die Dynamisierung des Systempreises  $SP_i(V_i)$ , in Abhängigkeit zur Systemverbreitung  $V_i$ , durch die Gleichung 3.1 operationalisiert.

Von einem Basispreis  $p_i$  ausgehend, der als gesättigter Marktpreis interpretiert werden kann, wird eine maximale Schwankungsbreite  $\Delta_i$  im Preis definiert. Über eine Exponentialfunktion und einen Entwicklungsfaktor  $k_i$  wird diese Schwankungsbreite in Abhängigkeit zur Verbreitung des betrachteten Systems gesetzt, womit die Preisfunktion in eine fallende - Exponentialfunktion überführt wird.

«Systempreis [GE]»	$SP_i(V_i) = p_i + \Delta_i \cdot e^{(-1 \cdot k_i \cdot V_i)} \quad (3.1)$
«Systemvariante»	$i$
«Basispreis [GE]»	$p_i$
«Systemverbreitung [Stk], [km]»	$V_i$
«maximale Preisschwankung [GE]»	$\Delta_i$
«Entwicklungsfaktor»	$k_i$

In der Summe stellen der Basispreis und die Preisschwankung den je Zeitschritt aktuellen Preis für ein System in einer Simulation dar. Dieser Preis definiert wiederum die Anschaffungsauszahlungen, die für ein System durch die Nachfrager aufgewendet werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Anschaffungsauszahlungen in Form von Systempreisen als Eingangsdatum exogen vorgegeben werden, um dann in Abhängigkeit zur Verbreitung der jeweiligen Systeme einer dynamischen Entwicklung unterworfen zu sein. (Abbildung 3.14)

### Periodische Auszahlungen

In den periodischen Auszahlungen manifestiert sich, dass die Installation und Nutzung von Zugbeeinflussungssystemen weitere Auszahlungen für Betrieb, Instandhaltung und Unverfügbarkeit über die gesamte Nutzungsdauer nach sich ziehen.

Für die Modellierung wird davon ausgegangen, dass die Periodenauszahlungen durch die Auszahlungen für die Instandhaltung der Systeme dominiert werden und Auszahlungen für den Betrieb und die Unverfügbarkeit von Systemen unberücksichtigt bleiben können.

Für die Betriebsauszahlungen der Systeme wird dazu angenommen, dass zum einen keine Hilfs- oder Betriebsstoffe benötigt werden und dass die verbleibenden Auszahlungen für den Personaleinsatz und Energieverbrauch im Vergleich zu den Auszahlungen für die anderen Systeme im Verbund der Sicherheitssysteme verschwindend gering sind.

Einen Hinweis auf die Plausibilität dieser Annahme liefert Lienau in seiner Arbeit zu Infrastrukturkosten. Hier wird für die Abbildung der jährlichen Kosten einer Eisenbahninfrastruktur auf direkte Kosten für die Betriebsführung verzichtet und lediglich auf die Herstell- und Instandhaltungskosten zurückgegriffen. [97]

Sollen diese Auszahlungen für die Betriebsführung dennoch explizit berücksichtigt werden, können sie als Pauschalbetrag auf den statischen Teil der periodischen Auszahlungen aufgeschlagen werden.

Auszahlungen im Zusammenhang mit der Unverfügbarkeit von Systemen entstehen, da Systemausfälle erfahrungsgemäß mit Fahrplaneinschränkungen und Folgekosten verbunden sind. Diese Folgekosten, die belastungsabhängig einen signifikanten Anteil an den periodischen Kosten von Eisenbahnanlagen allgemein ausmachen können [96, S. 73], ließen sich mit dem Konzept der Betriebserschwerungskosten abbilden. [153, S. 886]

Da jedoch der Beitrag der gesamten Leit- und Sicherungstechnik zur Unverfügbarkeit statistisch nachweisbar nur 1 % bis 2 % ausmacht [136, S. 12], kann auf die gesonderte

Modellierung verzichtet werden. Analog zu den Betriebsauszahlungen könnte eine Berücksichtigung aber über einen statischen Pauschalbetrag erfolgen.

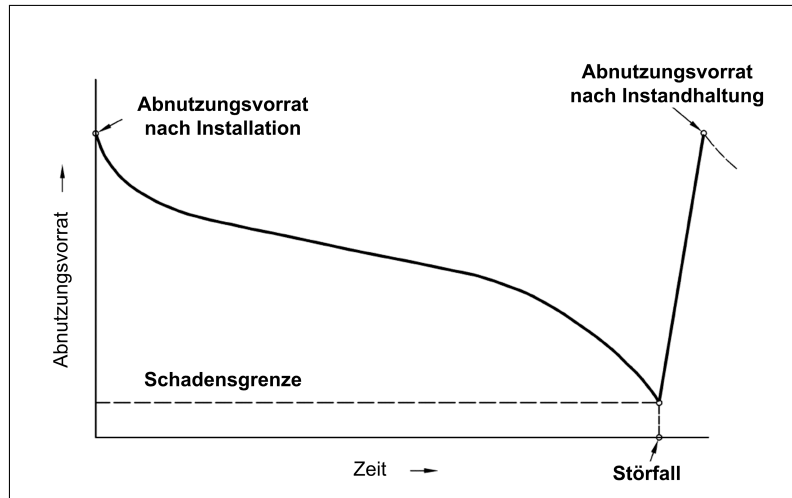


Abbildung 3.15.: Verlauf des Abnutzungsvorrates (Quelle: vgl. [113, S. 6])

Von herausragender Bedeutung für die periodischen Auszahlungen ist somit die Instandhaltung. Dieser werden der Norm DIN 31051:2003 folgend alle „technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen“ [113, S. 3] zugerechnet. Als Grundmaßnahmen der Instandhaltung sind „Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung“ definiert. [113, S. 2f.]

Zentraler Begriff in der Definition von Instandhaltung ist der „funktionsfähige Zustand“ eines Systems. Modelliert wird dieser Zustand als zeitabhängiger Abnutzungsvorrat, wie Abbildung 3.15 zeigt. Ist der Abnutzungsvorrat erschöpft, ist der Zustand des Systems nicht mehr funktionsfähig und es kommt zu einem Systemausfall. Um diesem Systemausfall vorzubeugen oder entgegenzuwirken, wird mittels der Eingriffsarten der Instandhaltung der Abnutzungsvorrat wieder erhöht bzw. auf einem bestimmten Level gehalten.

Hinsichtlich der Instandhaltungsstrategien, die verfolgt werden, lassen sich vier grundsätzliche Ansätze benennen, die sich durch die Definition der Eingriffsschwellen und unternommenen Maßnahmen unterscheiden. Es handelt sich dabei um die vorbeugende, zustandsbedingte, ausfallbedingte und die perfektive Instandhaltung [140, S. 36f.]. Für die Modellierung werden diese Strategien nicht unterschieden, sondern es wird davon ausgegangen, dass bei allen Systemen eine einheitliche Strategie zur Anwendung kommt.

Damit werden die Auszahlungen für die Instandhaltung abhängig von der Häufigkeit und dem Umfang der Systemeingriffe, die den Systemzustand erkennen und gegebenenfalls den funktionsfähigen Zustand wieder herstellen. Neben periodischen Interaktionen sind somit Ausfallraten und deren Verteilung im Nutzungszeitraum ausschlaggebend. Aus der Erfahrung und aus dem theoretischen Verlauf des Abnutzungsvorrates lässt sich das Konzept der „Badewannenkurve“ ableiten, das die Zahl der Ausfälle in einer idealisierten Form über die Nutzungsdauer eines Systems abbildet, Abbildung 3.16. [128, S. 18]

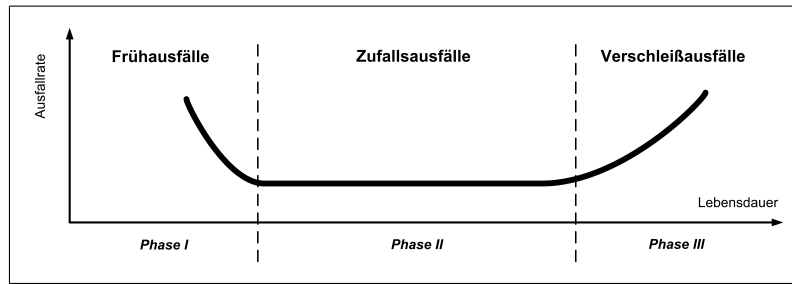


Abbildung 3.16.: Idealisierter Verlauf von Ausfallraten (Quelle: vgl. [76, S. 76])

Wird davon ausgegangen, dass ein Anstieg der Ausfälle zu einem Anstieg der Instandhaltungstätigkeiten und damit auch zu einem Anstieg der Instandhaltungsauszahlungen führt, lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Alter des Systems und den abhängigen Instandhaltungsauszahlungen konstruieren.

Für die mathematische Modellierung der periodischen Auszahlungen  $PA_i(t)$  eines Zugbeeinflussungssystems  $i$ , die durch die Instandhaltung dominiert werden, bedeutet dies, dass zu einem statischen Sockelbetrag, den Basisauszahlungen  $q_i$ , ein dynamischer Anteil  $\Delta_i$ , der als mittlere, periodische Steigerung der Auszahlungen zu interpretieren ist und an das Alter der Systeme gekoppelt ist, addiert wird.

«Periodische Auszahlungen [GE]»

$$PA_i(t) = \Delta_i * t + q_i \quad (3.2)$$

«Systemvariante»

 $i$ 

«dynamischer Anteil [GE]»

 $\Delta_i$ «Systemalter ( $t = 0, 1, \dots, n$ )» $t$ 

«Basisauszahlungen [GE]»

 $q_i$ 

Es ist jedoch herauszuheben, dass die Dynamisierung im Zusammenhang mit dem Alter des Systems in dieser Modellierung mit der Modellgleichung 3.2 nur auf das Ende des Lebenszyklus einer Systemeinheit hin wirkt. Diese Annahmen lässt sich dadurch plausibilisieren, dass die erhöhten Auszahlungen am Anfang des Lebenszyklus auch mit der global erreichten Verbreitung der Systeme, also den bis dato gewonnenen Erfahrungen korreliert. Diese Effekte jedoch sind bereits in den Anschaffungsauszahlungen berücksichtigt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Höhe der periodischen Auszahlungen linear an das Alter des jeweiligen Systems gekoppelt ist und diese Abbildung durch die Effekte der Instandhaltung dominiert wird.

### Entsorgungsauszahlungen

Der Einteilung der Lebenszyklusphasen für Bahnanwendungen in der Norm EN 50126 folgend, schließt sich an die Nutzung der Bahnsysteme als letzte Phase die „Stilllegung und Entsorgung“ an [112]. Wöhe spricht für diese Phase nur vom Liquidationserlös, der als positiver Zahlungsstrom die Investition abschließt [160, S. 754]. Jedoch muss für die Modellierung auch berücksichtigt werden, dass die Liquidation, also die Deinstallation von

Altsystemen, zusätzliche Auszahlungen bewirken kann, die in der Investitionsrechnung abbildbar sein müssen.

Jedoch kann nicht von vornherein von einem negativen Zahlungsstrom für alle Systemvarianten ausgegangen werden, da sich durch die Wiedergewinnung von Rohstoffen, zum Beispiel entlang der Verkabelung oder auch durch gezieltes Obsoleszenz-Management, somit der Weiterverwendung der Altsysteme als Ersatzteilkontingent [11, S. 150], Möglichkeiten eröffnen, positive Zahlungsströme zu realisieren.

In der Modellierung werden beide Möglichkeiten berücksichtigt. Weiterhin wird die Entwicklung der Entsorgungsauszahlungen, analog zu den Anschaffungsauszahlungen, an die aktuelle Verbreitung der jeweiligen Systeme gekoppelt, da eine Verbindung zwischen dem Ersatzteilmanagement, der Anzahl der verbleibenden Systeme und dem Wert der deinstallierten Systeme unterstellt wird.

Dies führt zu der Gleichung 3.3, die die Auszahlungen für die abschließende Entsorgung  $EA_i(V_i)$  jedes Systems quantifiziert.

$$EA_i(V_i) = c_i + \Delta_i \cdot e^{(-1 \cdot k_i \cdot V_i)} \quad (3.3)$$

«Entsorgungsauszahlung [GE]»	$i$
«Systemvariante»	$i$
«statische Basisauszahlung [GE]»	$c_i$
«Systemverbreitung [Stk], [km]»	$V_i$
«maximale Schwankung [GE]»	$\Delta_i$
«Entwicklungsfaktor»	$k_i$

Für die Bestimmung der Verbreitung  $V_i$  am Ende des Investitionszeitraums wird die Systemverbreitung des Zeitpunktes  $t_0$  mit einem der beiden Prognoseverfahren, die eingangs beschrieben worden sind, bis zum Zeitpunkt  $t_n$  projiziert. Dabei wird der Gesamtbestand des Fuhrparks bzw. der Infrastruktur zum Zeitpunkt  $t_0$  als Maximalwert somit als maximale Verbreitung verwendet.

Mit den Entsorgungsauszahlungen sind schließlich die Auszahlungen für die Investitionsrechnung in einer dynamischen Betrachtungsweise über den gesamten Lebenszyklus definiert. Diesen negativen Zahlungsströmen der Investitionsalternativen werden in der Investitionsrechnung die Einzahlungen als positive Zahlungsströme gegenüber gestellt.

### 3.4.2. Einzahlungen

Diese positiven Zahlungsströme werden im folgenden Kapitel entwickelt. Als Ausgangsbasis stellen dabei die Zugbeeinflussungssysteme einen Teilaspekt des integrierten Potentialdreiecks, wie es in den vorangegangenen Ausführungen entwickelt wurde, dar, in dem durch die Kombination der Produktionsfaktoren der interne Potentialfaktor Betriebsleistung erstellt wird.

Über die Vermarktung der Betriebsleistung auf dem Transportmarkt fließen dem EVU Erlöse zu, von denen das EIB über den Trassenmarkt einen Teil abschöpft. Im Weiteren wird davon ausgegangen, dass diese Erlöse auf beiden Seiten als Einzahlungen wirksam werden, das heißt, dass sich die Betriebsleistung für das EVU als auch für den EIB monetarisieren lässt.

Für Investitionsentscheidungen hinsichtlich der Betriebsmittel, also auch die Zugbeeinflussungssysteme, die mittels Investitionsrechnungen auf der Basis von Zahlungsströmen getroffen werden, wird somit eine direkte Abhängigkeit zwischen der erbrachten Betriebsleistung und den positiven Zahlungsströmen unterstellt.

### Die Produktionsfunktion des Potentialdreiecks

Davon ausgehend, ist es im Folgenden Ziel, die Betriebsleistung des Gesamtsystems einer Einheit der Betriebsmittel, einem Fahrzeug oder einem Streckenabschnitt bzw. Kilometer, in Abhängigkeit zur potentiellen Ausrüstung mit einem Zugsicherungssystem, zuzurechnen.

Durch die Abhängigkeit zur potentiellen Systemausrüstung entwickelt sich über den Begriff der „technischen Kompatibilität“ eine Abhängigkeit zur Verbreitung der kompatiblen Systemtechnik im jeweiligen komplementären Gegenpart. Damit wird schließlich die Betriebsleistung, die einer einzelnen Einheit zugerechnet wird, so wie in der Diskussion der Netzeffekte angesprochen, abhängig von der Größe der Installierten Basis. Wobei die Installierte Basis, wie ebenfalls bereits angedeutet, als die Menge der kompatiblen Systemtechnik im komplementären Gegenpart aufzufassen ist.

Über die Monetarisierung dieser (Teil-)Betriebsleistung einer einzelnen Betriebsmitteleinheit, also der Bewertung in Geldeinheiten, lässt sich für jede potentielle Ausrüstung schließlich ein Einzahlungsstrom für die angestrebte Investitionsentscheidung bestimmen. Den grundlegenden Ansatzpunkt bildet dabei das Potentialdreieck sowie eine hieraus entwickelte Produktionsfunktion.

Als Produktionsfunktion wird Schierenbeck folgend der quantitative „Zusammenhang zwischen den zur Leistungserstellung einzusetzenden Produktionsfaktormengen und der Ausbringung  $M$ “ [132, S. 237] verstanden. In dieser Funktion stehen als unabhängige Variablen die Mengen der Produktionsfaktoren in einem „technisch-wirtschaftliche[n] Verhältnis“ zur abhängigen Variable, der Ausbringungsmenge. [149, S. 19]

«Produktionsfunktion eines Einproduktunternehmens [132, S. 237]»

$$M = f(r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (3.4)$$

«Ausbringungsmenge»

$M$

«Produktionsfaktor»

$h=1,2,\dots,n$

«eingesetzte Menge»

$r_h > 0$

Diese allgemeine Form einer Produktionsfunktion, wie sie auch in der Gleichung 3.4 dargestellt ist, dient als Denkansatz für die weitere Entwicklung. Angewendet wird sie auf das einfache Potentialdreieck der vorangegangenen Kapitel. Die Erstellung einer vollständigen, geschlossenen Produktionsfunktion für das Eisenbahnsystem als Ganzes ist jedoch nicht Ziel der weiteren Untersuchung.

Allgemein hat Aberle für die Verkehrswirtschaft festgestellt, dass „eine Produktionsfunktion mit variabler Komplementarität vorliegt.“ Diese Variabilität liegt darin begründet, dass es viele „technische und ökonomische Optimalzustände“ gibt, die sowohl von der Leistungsfähigkeit der Verkehrswege als auch von Parametern der Verkehrsmittel abhängen. [1, S. 231]

Für die weitere Modellierung wird somit das Potentialdreieck aus dem Blickwinkel einer Produktionsfunktion betrachtet. Das Eisenbahnsystem des Potentialdreiecks stellt sich in diesem Kontext als Einproduktsystem dar, das die Betriebsleistung als Ausbringungsmenge  $TS$  in der Einheit Trassenkilometer produziert. Als Produktionsfaktoren greift dieses System auf den Fuhrpark  $FZG$  und die Infrastruktur  $KM$  zurück. Damit lässt sich das System in der allgemeinen Form in einer Produktionsfunktion darstellen, siehe Gleichung 3.5.

«Produktionsfunktion des Potentialdreiecks»	$TS = f(FZG, KM) \quad (3.5)$
«Ausbringungsmenge [Trkm]»	$TS$
«Menge - Fahrzeuge [Stk]»	$FZG$
«Menge - Streckenkilometer [km]»	$KM$

Die zentralen Annahmen der allgemeinen Produktionsfunktion, „beliebige Teilbarkeit und Homogenität“ [160, S. 478f.] der Produktionsfaktoren und des Produktes, sollen eingangs auch für die weitere Modellierung gelten.

Für die Produktionsfunktion, so wie sie hier als Ausgangspunkt dient, können die Eingangsdaten als sicher im Eintreffen angenommen werden. Außerdem wird die Zeit in der Produktionsfunktion nicht berücksichtigt. Damit liegt der Modellierung im Weiteren ein „statisch-deterministisches Produktionsmodell“ zugrunde. [160, S. 479f.]

Bei den Kombinationsmöglichkeiten der Produktionsfaktoren ist von einer „begrenzten, peripheren Substitution“ auszugehen, da es einer Mindestmenge eines jeden Faktors bedarf, um eine sinnhafte Produktionsfunktion zu erhalten [160, S. 482]. Dieser Zwang zur Mindestmenge eines Faktors lässt sich aus der Komplementarität der beiden Produktionsfaktoren ableiten, die nur im Zusammenspiel die Produktion der Betriebsleistung sicherstellen können. [1, S. 231]

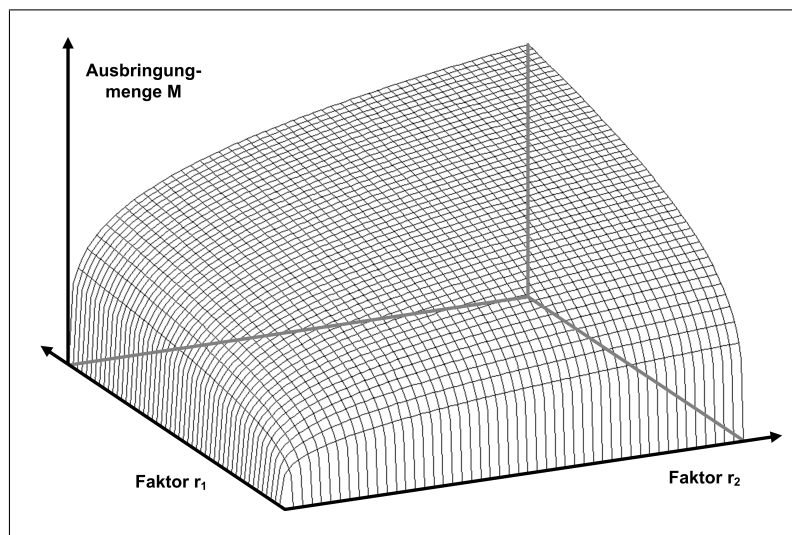


Abbildung 3.17.: Fiktives Ertragsgebirge mit zwei Produktionsfaktoren

Für die Nutzung einer Produktionsfunktion als Modell definiert Wöhe drei Fragestellungen, die entlang der Produktionsfunktion untersucht werden können. Dabei wird entweder die Ausbringungsmenge, die Menge der Produktionsfaktoren oder das Verhältnis der Produktionsfaktoren variiert und die damit verbundenen Auswirkungen auf die abhängigen Faktoren analysiert. [160, S. 483]

An dieser Stelle weicht die Modellierung vom klassischen Einsatzgebiet der Produktionsmodelle ab. Ziel der Modellierung ist es weder eine geschlossene Produktionsfunktion zu definieren, noch durch Faktorvariationen ein optimales Verhältnis zwischen den Produktionsfaktoren zu bestimmen, sondern bei gegebener Ausbringungsmenge sowie gegebenem Faktoreinsatz einer einzelnen Einheit der Produktionsfaktoren, später in Abhängigkeit zur Ausrüstung mit Zugbeeinflussungssystemen, eine Menge an Betriebsleistung zuzurechnen.

Diese zugerechnete Betriebsleistung, interpretierbar als Faktorproduktivität, wiederum stellt dann den Beitrag einer einzelnen Betriebsmitteleinheit zur gesamten Ausbringungsmenge dar, der monetär bewertet in die Investitionsrechnung einfließt. Damit ist anstatt eines vollständigen Ertragsgebirges nur ein temporärer Gleichgewichtspunkt aus diesem Gebirge, definiert durch eine Eingangsmenge an Ausbringung und die jeweiligen Produktionsfaktoren, von Interesse.

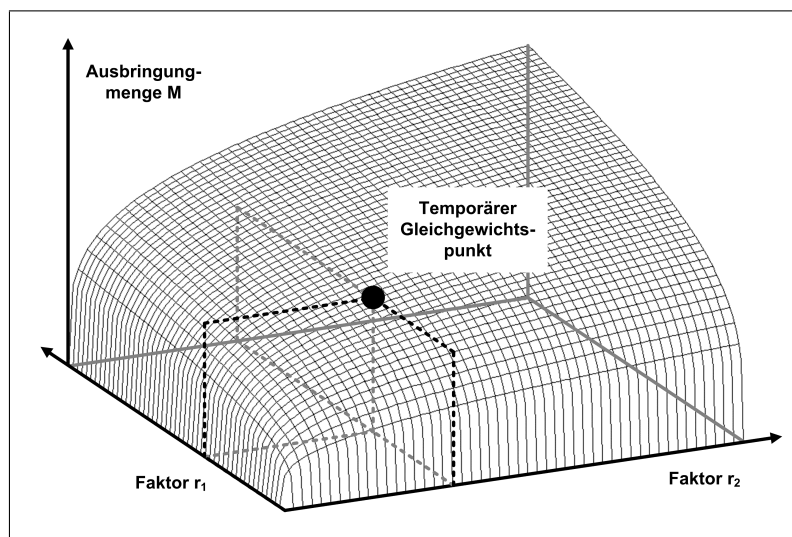


Abbildung 3.18.: Gleichgewichtspunkt im Ertragsgebirge

Die Abbildungen 3.17 und 3.18 stellen diese Situation dar. Auf der einen Seite ist in der Darstellung einer Produktionsfunktion (ein Produkt, zwei Produktionsfaktoren) ein fiktives Ertragsgebirge und auf der anderen Seite eine Betrachtung eines einzelnen Gleichgewichtspunktes festgehalten. Im Zeitverlauf einer Simulation kann sich der Gleichgewichtspunkt verschieben, so dass zum Zeitpunkt  $t$  immer nur ein temporärer Gleichgewichtspunkt ausschlaggebend ist.

Mit dem Zusammenspiel der Vorgabe einer Mindestmenge an Produktionsfaktoren und der Betrachtung eines Punktes im Ertragsgebirge ist jedoch eine Problematik verbunden,



die diskutiert und in der Anwendung des Modells beachtet werden muss.

Wird die Faktormindestmenge unterschritten, aber trotzdem eingangs noch eine Ausbringungsmenge definiert, kommt es auf den verbleibenden Faktoreinheiten zu einem starken Anstieg der Belastung, die über die Kapazität bzw. Leistungsfähigkeit hinausgehen kann. Ist diese Leistungsfähigkeit, als exogene Variable definiert, überschritten, fällt alle darüberhinaus gehende Leistung aus der Modellierung heraus und verzerrt somit die Abbildung des Modells. Der Extrempunkt einer derartigen Verzerrung liegt vor, wenn es auf einer Seite der Produktionsfaktoren keine - kompatiblen - Betriebsmitteleinheiten gibt und damit die gesamte zuzurechnende Betriebsleistung aus der Modellierung herausfällt.

Diese Problematik stellt sich im undifferenzierten und einfach differenzierten Modell nicht. Lediglich im integrierten Potentialdreieck, in dem die Zugbeeinflussungssysteme über technische Inkompatibilität Ausschlüsse produzieren können, muss die Möglichkeit dieser Verzerrung bei der Interpretation von Ergebnissen berücksichtigt werden.

Trotzdem bildet die einfache Produktionsfunktion  $TS = f(FZG, KM)$  die Grundlage für die weitere Modellierung. In diese Produktionsfunktion wird im Folgenden die Kategorisierung für das Produkt als auch für die Produktionsfaktoren eingeführt.

Wie bereits mehrfach angesprochen, lässt sich diese Kategorisierung in ihren Dimensionen aus den Eigenschaften der Verkehrsdienstleistung ableiten. Im Zentrum stehen dabei die Dimensionen der Leistung- bzw. Transportobjekte, die maximal bzw. durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit, die durchschnittliche Transportweite und die Leistungsfähigkeit des Eisenbahnsystems bzw. seiner Teilsysteme.

Die folgende Entwicklung einer Kategorisierung, die sich an das deutsche Eisenbahnsystem anlehnt, ist dabei nur als Anhaltspunkt zu sehen, da die konkrete Ausgestaltung und Anwendung der Kategorien in verschiedenen Simulationsszenarien variiert werden kann.

### Einführung der Modellkategorisierung

Wie eingangs diskutiert, sind die Leistungsobjekte, die für den Begriff Verkehr in dieser Arbeit erfasst werden, auf Güter und Personen beschränkt. Aus diesen beiden Hauptgruppen der Leistungsobjekte und einer Differenzierung des Personentransportes entlang der durchschnittlichen Transportweite können die drei grundlegenden Dimensionen für die Kategorisierung der Betriebsleistung entwickelt werden, Schienengüterverkehr (SGV), Schienenpersonennah- (SPNV) sowie -fernverkehr (SPFV).

Für eine weitere Differenzierung, die auf die Betrachtung von Zugsicherungssystemen abgestimmt ist, kommt die gefahrene Geschwindigkeit zum Einsatz. Dabei wird die Geschwindigkeit in fünf Cluster eingeteilt, die mit den drei grundlegenden Transportkategorien in einer Matrix zusammengeführt werden. Prinzipiell ergeben sich somit 15 Kategorien für die Differenzierung der Betriebsleistung.

Da jedoch für den Schienengüterverkehr und den Schienenpersonennahverkehr angenommen werden kann, dass vorwiegend Geschwindigkeiten unter 160 km/h gefahren werden, werden für die höheren Geschwindigkeitscluster keine Kategorien berücksichtigt. Außerdem wird, der Definition der Richtlinie 96/48/EG<sup>40</sup> folgend, der Personenfernverkehr

---

<sup>40</sup> Anhang I Kapitel 1, 2 RL 96/48/EG [56]

mit Spitzengeschwindigkeiten über 230 *km/h* als Hochgeschwindigkeitsverkehr berücksichtigt. Letztlich, mit dem Ausschluss von Personenfernverkehren mit durchschnittlichen Geschwindigkeiten unter 80 *km/h*, ergeben sich je Güterkategorie drei Geschwindigkeitsstufen, die als langsam, normal und schnell bezeichnet werden.

Tabelle 3.1.: Kategorisierung des Fuhrparks und der Betriebsleistung

Geschwindigkeitsband [km/h]	SGV	SPFV	SPNV
>231		(1) HGV	
230 - 161		(2) sSPFV	
160 - 121	(5) sSGV	(3) SPFV	(8) sSPNV
120 - 81	(6) SGV	(4) lSPFV	(9) SPNV
<80	(7) lSGV		(10) lSPNV

Somit entstehen für die Kategorisierung der Betriebsleistung zehn Kategorien, die in der Tabelle 3.1 dargestellt sind. Da für die Modellierung ein starker Bezug zwischen der produzierten Betriebsleistung und dem eingesetzten Fuhrpark angenommen wird, kommt für den Fuhrpark die gleiche Kategorisierung zum Einsatz.

Für die Netzkategorisierung bieten sich aus der Kombination der Eigenschaften der Verkehrsdienstleistung und der Fahrwegskapazitäten die Streckenstandards der DB Netz AG aus der Richtlinie 413 „Infrastruktur gestalten“ [31] an. Damit entsteht ein Grundgerüst der Differenzierung, wie es in der Tabelle 3.2 dargestellt ist.

Tabelle 3.2.: Streckenstandards der Richtlinie 413 der DB Netz AG [vgl. 31]

Index	Streckenstandard	Streckenauslastung [Z/d je Richtung]	Leitgeschwindigkeit [km/h]	vorherrschende Verkehrskategorie
1	P300	120	231 - 300	HGV
2	P230	120	161 - 200	SPFV
3	M230	150	161 - 200	SPFV/SGV
4	P160I	120	121 - 160	SPFV/SPNV
5	P160II	60	121 - 160	SPFV/SPNV
6	M160	150	121 - 160	SPFV/SPNV/SGV
7	G120	100	81 - 120	SGV
8	R120	40	81 - 120	SPNV
9	R80	25	51 - 80	SPNV
10	G50	10	50	SGV

Neben diesen zehn Kategorien werden im Modell weitere Kategorien berücksichtigt, die die Abbildung zum einen der europäischen Korridore und zum anderen einer Grenzregion ermöglichen.

Durch die explizite Berücksichtigung der EU-Korridore kann innerhalb der Modellierung die forcierte Migrationsstrategie für ETCS, die mit dem Korridorkonzept verbunden ist, abgebildet werden. Mit der Grenzkategorie wird in der Modellierung berücksichtigt,

dass grenznahe Infrastrukturen in ihrer Ausrüstung einen Einfluss auf die Ausrüstung des Fuhrparks und damit indirekt auch auf die Ausrüstung des nationalen Netzes haben. Insgesamt sind somit im Modell 15 Netzkategorien integriert.

In die Gleichung der Produktionsfunktion, die das Ziel der Kategorisierung darstellt, findet die Kategorisierung durch eine Indizierung Eingang. Zum einen handelt es sich dabei für die Betriebsleistung und die Fahrzeuge um den Index  $TK$  als Transportkategorie und zum anderen für die Netzkategorien um den Index  $NK$ .

Letztlich müssen die eben entworfenen Kategorien der drei Eckpunkte des Potentialdreiecks zueinander in Bezug gesetzt werden. Dabei ist vorwegzunehmen, dass zwischen dem Fuhrpark und dem Netz - bis jetzt - keine direkte Beziehung besteht und somit die Betriebsleistung als Mittler dazwischen geschaltet ist. Hierdurch wird der Trassenkilometer „die zentrale Verrechnungseinheit zwischen der Verkehrsinfrastruktur und den Verkehrsmitteln“ [1, S. 233]. Die prinzipielle Darstellung der Beziehungen im differenzierten Potentialdreieck spiegelt die Abbildung 3.19 wider.

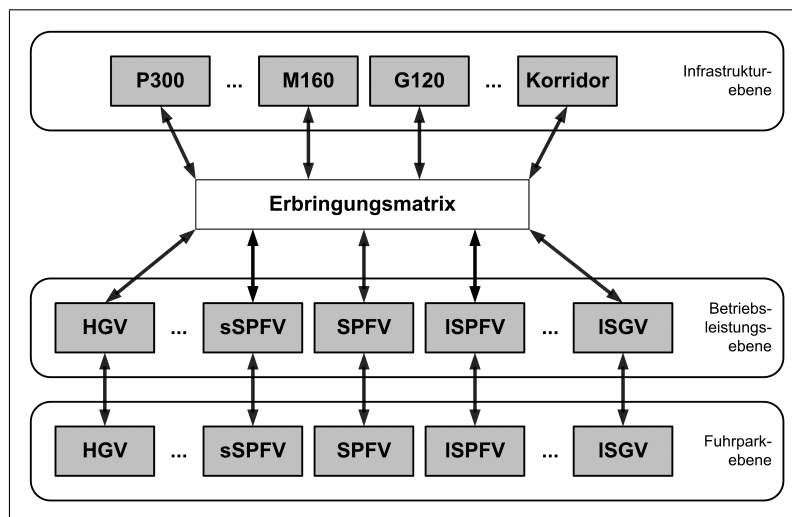


Abbildung 3.19.: Differenziertes Potentialdreieck

Für die Beziehungen zwischen der Betriebsleistung und dem Netz wird der Blickwinkel eingenommen, dass eine Kategorie der Betriebsleistung über mehrere Streckenkategorien hinweg erbracht wird bzw. werden kann. Somit muss für jede Betriebsleistungskategorie definiert werden, zu welchem prozentualen Anteil diese in einer Netzkategorie produziert wird. Hierzu wird für die Modellierung die Größe des „Erbringungssatzes“  $\beta_{NK}^{TK}$  eingeführt, die eben diesen prozentualen Anteil je Netz- und Betriebsleistungskategorie widerspiegelt.

Zusammengefasst über alle Kategorien entsteht aus den einzelnen Erbringungssätzen eine „Erbringungsmatrix“  $B$ . Als fiktives Beispiel für das Konstrukt der Erbringungssätze könnte z.B. für die Betriebsleistungskategorie SPNV angenommen werden, dass deren Gesamtleistung zu 15 % in der Netzkategorie M160, zu 35 % in der Netzkategorie R120 und zu 50 % in der Netzkategorie R80 erbracht wird.

Wie bereits in der Herleitung der Kategorisierung für den Fuhrpark und die Betriebsleis-

tung angesprochen, wird für die Modellierung von einer sachlichen Parallelität beider Seiten ausgegangen. Dies hat zum einen zu einer gleichartigen Kategorisierung geführt und fließt zum anderen in die Definition der Abhängigkeiten ein. Für diese Betriebsleistung-Fuhrpark-Abhängigkeit wird eine direkte Zuordnung angenommen, die jeder Fuhrpark-kategorie genau eine Kategorie der Betriebsleistung zuordnet. Damit wird vorausgesetzt, dass die Zuordnung von Fahrzeugen zu einer Art von Betriebsleistung für den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeuges modellexogen vorgegeben werden muss.

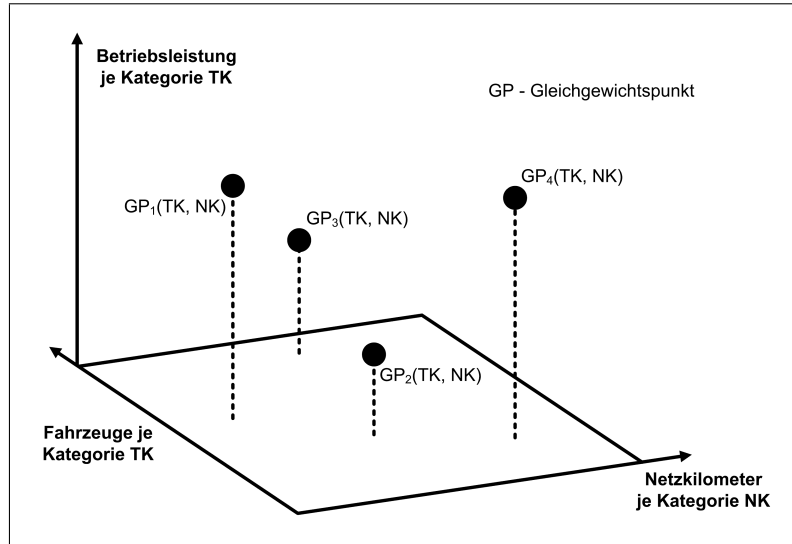


Abbildung 3.20.: Multiple Gleichgewichtspunkte im Ertragsgebirge

Würde diese Annahme nicht getroffen, müsste zusätzlich zum eigentlichen Modellierungsziel der Arbeit noch die optimale Zuordnung von Fahrzeugen zu den Betriebsleistungskategorien abgebildet werden, was jedoch eines eigenen Modells bedarf. Weiterhin kann gedanklich vorweggenommen werden, dass, wenn Fahrzeuge mehreren Leistungskategorien zugeordnet werden, sich die Ausstattung der Fahrzeuge mit Zugsicherungssystemen an den höchsten Forderungen ausrichtet, da sonst die höchstwertige Betriebsleistung nicht erbracht werden kann. Dies würde tendenziell zu komplexen Systemausstattungen führen, was jedoch gerade unter Aspekten einer wirtschaftlichen, kostenoptimalen Systemausstattung für die Realität als auch für die Modellierung abzulehnen ist.

Für die Beschreibung der Produktionsfunktion ergibt sich in der Zusammenführung der Überlegungen die Gleichung 3.6.

$$\begin{array}{ll}
 \text{«Produktionsfunktion»} & TS^{TK} = f((FZG^{TK}), (KM^{NK}), (\beta_{NK}^{TK})) \quad (3.6) \\
 \text{«Index der Transport- & Fahrzeugkategorien»} & TK \\
 \text{«Index der Netzkategorien»} & NK \\
 \text{«Erbringungssatz»} & \beta_{NK}^{TK}
 \end{array}$$

Damit ist aus der einfachen Einprodukt- eine Mehrproduktfunktion geworden, die im

Weiteren als Grundlage für die Modellierung dient. Für das oben eingeführte Konstrukt des Gleichgewichtspunktes bedeutet dies, dass es multiple Punkte gibt, die jeweils lokale Gleichgewichte der verschiedenen Betriebsleistungskategorien in den jeweiligen Fuhrpark- und Netzkategorien beschreiben, Abbildung 3.20.

### Einführung der Systempakete als Ausrüstungsoption

Mit der Einführung der Systempakete als Ausrüstungsinformation für jede Einheit des Fuhrparks und der Infrastruktur wird schließlich ein direkter Bezug zwischen den beiden Potentialfaktoren hergestellt. Wie bereits dargestellt, steht dabei der Begriff der „technischen Kompatibilität“ im Zentrum der Betrachtungen. Diese technische Kompatibilität realisiert sich in dem Systemverbund zwischen Fahrzeugsystem  $FSys$  und Streckensystem  $NSys$ . Die Auswertung der modellexogen vorzugebenden Leistungs- und Forderungslevel führt zu einer Kompatibilitätsmatrix  $^{NK}_{FSys} K^{TK}_{NSys}$ , die definiert, welche Kombinationen von Systempaketen in bestimmten Netzkategorien für die jeweiligen Betriebsleistungskategorien als kompatibel gelten.

$$\begin{array}{ll}
 \text{«Produktionsfunktion»} & TS^{TK} = f((FZG^{TK}_{FSys}), (KM^{NK}_{NSys}), (B), (^{NSys}_{FSys} K^{TK}_{NK})) \quad (3.7) \\
 \text{«Index der Fahrzeugsystempakete»} & FSys \\
 \text{«Index der Netzsysteypakete»} & NSys \\
 \text{«Erbringungsmatrix»} & B \\
 \text{«Kompatibilitätsmatrix»} & ^{NK}_{FSys} K^{TK}_{NSys}
 \end{array}$$

Bei vollständiger Kompatibilität geht dieses integrierte Modell in das differenzierte Potentialmodell über, da aus den betrachteten Zugangsvoraussetzungen keine Restriktionen erwachsen. Sind in der technischen Kompatibilität jedoch auch Inkompatibilitäten zwischen Netzteilen und Fahrzeugen angelegt, kommt es zu Einschränkungen in der Interaktion der beiden Seiten. Diese Einschränkungen, die von den bestehenden Ausrüstungen der einzelnen Einheiten abhängig sind, fließen im Weiteren in die Berechnung der Produktivität ein.

Auf diesem Weg entsteht eine Abhängigkeit, die verschiedenen Ausrüstungsvarianten unterschiedliche Produktivitäten zuordnet, die wiederum zu Unterschieden in den Einzahlungen führt. Dieser Sachverhalt wird in die allgemeine Produktionsfunktion durch die Einführung der Zugbeeinflussungssysteme integriert und stellt sich dann wie in Gleichung 3.7 dar.

Damit wird die angestrebte Zurechnung von Betriebsleistung zu einzelnen Produktionsfaktoreinheiten in Abhängigkeit zur Systemausrüstung der Einheit gebracht. Daraus folgt der weitere Ansatzpunkt für die Modellierung und Definition der Investitionsrechnung in der Überlegung, dass Inkompatibilität zu Abschlägen in der maximal möglichen, zugerechneten Betriebsleistung, somit zu einer geringeren Produktivität der betrachteten Einheit führt und damit das betroffene System(-paket) letztlich einen geringeren Einzahlungsstrom generiert. [2]

An dieser Stelle geht die Betrachtung einer allgemeinen Produktionsfunktion über in die Betrachtung der ausrüstungsabhängigen Produktivitätsrechnung für die einzelnen

Einheiten der Produktionsfaktoren. Wie eben gezeigt, nimmt die Definition der technischen Kompatibilität dabei einen zentralen Platz ein. Da diese nur im Zusammenspiel der beiden komplementären Seiten, Netz und Fuhrpark, gesehen werden kann, muss für die Entwicklung der ausrüstungsabhängigen Produktivität grundsätzlich der jeweils komplementäre Gegenpart des betrachteten Systems mit einbezogen werden. Somit schlägt sich an diesem Punkt die Einordnung der Zugbeeinflussungssysteme als bedingte Netzeffektgüter (siehe Kapitel 2.2.1), aus der die Abhängigkeit zur Verbreitung komplementärer und kompatibler Systemtechnik resultiert, nieder.

Den Ausgangspunkt für die Überlegung stellt dabei immer ein temporärer Gleichgewichtspunkt der Produktionsfunktion dar. Ausgehend von diesem Gleichgewichtspunkt wird für ein potentiell Fahrzeugsystempaket  $pFSys$  bzw. ein potentiell Netzsystempaket  $pNSys$  die Produktivität der auszurüstenden Produktionsfaktoreinheit berechnet, die dann monetarisiert in die Investitionsrechnung und damit in die Investitionsentscheidung über ein potentiell Systempaket einfließt. Diese Entwicklung der Produktivität wird im Folgenden für beide Seiten getrennt dargestellt.

### Produktivität eines Fahrzeugsystempaketes

Auf der Fahrzeugseite ist für ein neu auszurüstendes Fahrzeug in einer Transportkategorie die Produktivität für alle potentiellen Fahrzeugsystempakete als die Ausrüstungsalternativen zu bestimmen.

Wie bereits dargestellt, muss im Zuge der technischen Kompatibilität die Modellierung der fahrzeugseitigen, ausrüstungsabhängigen Produktivität in Abhängigkeit zur Ausrüstung des Netzes als komplementärer Gegenpart erfolgen.

Da der Ausgangspunkt der temporäre Gleichgewichtspunkt der Produktionsfunktion ist, der für eine Transportkategorie je Netzkategorie definiert ist, setzt die Berechnung der Produktivität in den Grenzen einer Netzkategorie an. Hierin wird, der Homogenitätsannahme der Produktionsfunktion folgend, die Betriebsleistung des Gleichgewichtspunktes über alle potentiell kompatiblen Netzkilometer verteilt.

„Potentiell“ bedeutet dabei, dass das Ausrüstungspaket eines Kilometers zumindest theoretisch mit einem Fahrzeugsystempaket, ungeachtet einer Realisation, technisch kompatibel ist. Die Gleichverteilung der Betriebsleistung über die anteilige Menge (Gl. 3.8) eines Ausrüstungspaketes führt zur Größe der „verteilten Betriebsleistung“ (Gl. 3.9).

$$\text{«Anteil je Netzsystem [1]»} \quad {}^{NK}\alpha_{NSys}^{TK} = \frac{({}^{NK}KM_{NSys}^{TK})}{(KM_{TK}^{NK})} \quad (3.8)$$

$$\text{«verteilte Betriebsleistung [Trkm]»} \quad {}^{NK}TS_{NSys}^{TK} = (TS_{TK}^{NK}) \cdot ({}^{NK}\alpha_{NSys}^{TK}) \quad (3.9)$$

$$\text{«abhängige Betriebsleistung [Trkm]»} \quad {}^{NK}TS_{pFSys}^{TK} = \sum (({}^{NSys}K_{FSys}^{TK}) \cdot ({}^{NK}TS_{NSys}^{TK})) \quad (3.10)$$

Über die Kompatibilität zwischen den Systempaketen der Netzkilometer und des betrachteten Fahrzeugs, repräsentiert durch die Kompatibilitätsmatrix, kann die Menge der „abhängigen Betriebsleistung“, Gleichung 3.10, definiert werden. In dieser Größe wird dem

potentiellen Fahrzeugsystempaket die Betriebsleistung zugerechnet, die auf kompatiblen Netzkilometern erbracht wird.

Bei dieser Größe ist jedoch zu berücksichtigen, dass sie von allen Fahrzeugen erbracht wird, die - zumindest anteilig - auf den kompatiblen Netzkilometern fahren können. Somit wird im Weiteren die Menge der Fahrzeuge bestimmt, die als „Konkurrenzfahrzeuge“ an der Menge der abhängigen Betriebsleistung beteiligt sind. Ausschlaggebend für die Konkurrenzsituation verschiedener Fahrzeuge ist aus Modellsicht der „gemeinsame Bewegungsraum“, den die Fahrzeuge teilen.

$$\text{«Fahrweite von FSys [km]»} \quad {}^{NK}FW_{FSys}^{TK} \quad (3.11)$$

$$\text{«Fahrweite von pFSys [km]»} \quad {}^{NK}FW_{pFSys}^{TK} \quad (3.12)$$

$$\text{«gemeinsame Fahrweite [km]»} \quad {}^{NK}_{pFSys}gFW_{FSys}^{TK} \quad (3.13)$$

Dieser „Bewegungsraum“ oder auch „Fahrweite“ ist durch die Kompatibilität je Fahrzeugsystem, je Netzkategorie und je Transportkategorie definiert und stellt sich als die Menge aller kompatiblen Netzkilometer dar. Die „gemeinsame Fahrweite“ (Gl. 3.13) ist die Menge an Kilometern, die sowohl von dem potentiellen Fahrzeugsystempaket als auch von den existierenden Systempaketen befahren werden kann.

Die Quotienten aus der gemeinsamen Fahrweite (Gl. 3.13) und den individuellen Fahrweiten je System (Gl. 3.11 & 3.12) spiegeln den Grad der Überschneidung der Bewegungsräume der Systeme wider. Durch die Multiplikation der beiden Quotienten entsteht für ein Paar aus potentiell und realem Systempaket ein „Konkurrenzfaktor“, Gleichung 3.14, der die potentielle Fahrzeugausrüstung zu der Menge der bestehenden Ausrüstungen in Beziehung setzt.

$$\text{«Konkurrenzfaktor [1]»} \quad {}^{NK}_{pFSys}KF_{FSys}^{TK} = \frac{({}^{NK}_{pFSys}gFW_{FSys}^{TK})^2}{({}^{NK}FW_{FSys}^{TK}) \cdot ({}^{NK}FW_{pFSys}^{TK})} \quad (3.14)$$

$$\text{«Konkurrenzfahrzeuge [Fzg]»} \quad {}^{NK}KFZG_{pFSys}^{TK} = \sum_{FSys} (({}^{NK}_{pFSys}KF_{FSys}^{TK}) \cdot (FZG_{FSys}^{TK})) \quad (3.15)$$

Um schließlich die Menge der Konkurrenzfahrzeuge zu bestimmen, wird der Konkurrenzfaktor mit den jeweiligen Mengen der bestehenden Fahrzeugsysteme multipliziert und über alle Ausrüstungspakete aufsummiert, Gleichung 3.15. Diese Menge der Konkurrenzfahrzeuge ist als Fahrzeugmenge zu interpretieren, die die abhängige Betriebsleistung gleichverteilt je Fahrzeug erbringt.

$$\text{«abhängige Einzelbetriebsleistung [Trkm]»} \quad {}^{NK}\bar{T}S_{pFSys}^{TK} = \frac{({}^{NK}T_{pFSys}^{TK})}{(({}^{NK}_{pFSys}KFZG^{TK}) + 1)} \quad (3.16)$$

$$\text{«Gesamteinzelbetriebsleistung [Trkm]»} \quad \bar{T}S_{pFSys}^{TK} = \sum_{NK} ({}^{NK}_{pFSys}\bar{T}S^{TK}) \quad (3.17)$$

Durch die Division dieser abhängigen Betriebsleistung durch die Menge der Konkurrenzfahrzeuge plus das eine potentiell neue Fahrzeug kann die Betriebsleistung auf eine

einzelne Fahrzeugeinheit bezogen und die „abhängige Einzelbetriebsleistung“ errechnet werden, Gleichung 3.16.

Als nächster Schritt wird die „abhängige Einzelbetriebsleistung“ über alle Netzkategorien aufsummiert (Gl. 3.17), da Transportprozesse in der Modellierung über mehrere Netzkategorien reichen können.

Damit ist eine „Gesamteinzelbetriebsleistung“ definiert, die zum aktuellen Zeitpunkt  $t_0$  einem potentiellen Fahrzeugsystempaket zugerechnet werden kann. Für die Integration dieser Nutzenkomponente in den Kapitalwert ist diese Leistungsgröße über die gesamte Nutzungsdauer der Investition zu prognostizieren und zu monetarisieren.

Als Prognoseverfahren können die beiden eingangs diskutierten Verfahren, die Regressionsanalyse oder die Fortschreibung, zur Anwendung kommen. Für diese Prognosen werden die Werte der periodischen Gesamteinzelbetriebsleistungen auf eine modellexogen vorgegebene Obergrenze limitiert.

Die pekuniäre Bewertung dieser periodischen Gesamteinzelbetriebsleistungen stellt schließlich den letzten Schritt der Entwicklung der Einzahlung auf der Fahrzeugseite dar, Gleichung 3.18.

$$\text{«Einzahlungen [GE]»} \quad E_{pFSys}^{TK} = (\bar{T}S_{pFSys}^{TK}) \cdot (\epsilon^{TK}) \quad (3.18)$$

Der Monetarisierungskoeffizient  $\epsilon^{TK}$  ist ebenfalls modellexogen vorzugeben. Dabei eröffnet sich ein zweistufiges Bewertungsproblem: zum einen das angesprochene Problem der Bewertung der Monetarisierung der Betriebsleistung allgemein, zum anderen die Zurechnung von Einzahlungen aus der Betriebsleistung zum Teilsystem Zugsicherungssystem.

Im ersten Punkt bietet sich die Übertragung der Erlöse aus der Verkehrsleistung auf die entsprechende Betriebsleistung an. Innerhalb einer Transportkategorie stellt dies aber eine vereinfachende Annahme dar, da verschiedenen Betriebsleistungen unterschiedliche Auslastungs- und damit auch unterschiedliche Erlösstrukturen zugrunde gelegt werden können. In der Modellierung ist jedoch von den zentralen Informationen dieser Differenzierung, genaue Streckenzugehörigkeit und unterzeitschrittgenaue Zeitbetrachtung, abstrahiert worden, was implizit zu der Annahme einer durchschnittlichen Auslastung führt.

Für den zweiten Punkt der Zurechnung der Einzahlungen aus der Betriebsleistung zum Teilsystem Zugbeeinflussung und Zugsicherung müssen ebenfalls Annahmen getroffen werden. Hier bietet sich zum Beispiel eine Orientierung des Zurechnungsanteils am Kostenanteil der Sicherungssysteme an den Gesamtkosten an.

Letztendlich werden die periodischen Einzahlungen neben den Auszahlungen in den Kapitalwert integriert, der schließlich als Investitionsrechnungsmethode die Rangfolgebildung und schließlich die Auswahl eines potentiellen Fahrzeugsystempaketes als zu realisierende Investitionsalternative vorbereitet.

### Produktivität eines Netzsystempaketes

Analog dazu stellt sich die Entwicklung der Einzahlungen auf der Netzseite dar. Auch hier ist für ein neues, potentielles Netzsystempaket in einer Netzkategorie die Produk-



tivität zu bestimmen, die als Maß des Nutzens in den Kapitalwert und damit in die Investitionsentscheidung einfließt.

Wiederum ist die rechnerische Verbindungsgröße die Betriebsleistung in der Einheit Trassenkilometer. Wird diese Betriebsleistung zu einem einzelnen Kilometer in Bezug gesetzt, führt dies zu der Einheit „Trasse“  $[Tr]$ , die schließlich als die Produktivität dieses Kilometers interpretiert werden kann.

Dies führt zu der grundsätzlichen Überlegung, dass jede Trasse, also Zugbewegung über einen Kilometer, die vom EVU in sein Verkehrsdienstleistungsangebot integriert wird, für den EIB als Einzahlung je Kilometer wirksam wird. In diesem Zusammenhang sei nochmals die Annahme herausgestellt, dass jegliche Interaktionen zwischen den EVUs und den EIBs lediglich über den Trassenmarkt stattfindet.

Aus der weiteren Annahme, dass das Gewinnstreben den EIB leitet, lässt sich somit ableiten, dass der EIB bestrebt ist, möglichst viele Trassen zu veräußern. Bei steigender Auslastung bis zu einer Überlastungsgrenze kommen, gerade bei sehr hohen fixen Kosten, wie sie bei der Vorhaltung der Gleisinfrastruktur gegeben sind, weiterhin noch sinkende Durchschnittskosten je Nutzungseinheit zum Tragen [75, S. 64]. Diese Kostendegressionseffekte lassen sich den „Economies of Density“ zuordnen, die zum Beispiel von Caves als eine transportspezifische Variante der „Economies of Scale“ herausgearbeitet wurden. [26, S. 472]

Im Zusammenspiel der beiden Annahmen, steigende Erlöse und sinkende Stückkosten bei zunehmender Auslastung, lässt sich ableiten, dass der EIB bestrebt ist, sein Netz und damit seine Streckenkilometer bestmöglich auszulasten und für die größtmögliche Anzahl von Fahrzeugen befahrbar zu machen. Mit Hinblick auf die Zugangsvoraussetzungen und die technische Kompatibilität muss vor diesem Hintergrund die Ausrüstungsentscheidung eines Kilometers mit einem bestimmten Zugbeeinflussungssystem als Ausschlussentscheidung von inkompatiblen Fahrzeugen gesehen werden, die sich, so die Modellierungsannahme, negativ auf die Auslastung auswirkt.

Vor dem Hintergrund der Netzeffekttheorie kann an diesem Punkt, wiederum über die Abhängigkeit des Nutzens von der Verbreitung kompatibler Systemtechnik im komplementären Gegenpart, die herausgearbeitete Einordnung der ZBS in die Kategorie der „bedingten Netzeffektgütern“ in die Modellierung integriert werden.

Ausgangspunkt für die weitere Entwicklung der ausrüstungsabhängigen Produktivität eines Netzsystempaketes, die die Grundlage für die Einzahlungen für die Investitionsrechnung darstellt, bildet abermals ein temporärer Gleichgewichtspunkt der Produktionsfunktion. Von diesem Punkt aus bildet die Betrachtung des komplementären Gegenparts, des Fuhrparks, den Einstieg.

$$\begin{array}{l} \text{«Anteil des Fahrzeugsystems [1]»} \end{array} \quad \alpha_{FSys}^{TK} = \frac{(FZG_{FSys}^{TK})}{(FZG^{TK})} \quad (3.19)$$

$$\begin{array}{l} \text{«verteilte Betriebsleistung [Trkm]»} \end{array} \quad {}^{NK}TS_{FSys}^{TK} = (TS_{TK}^{NK}) \cdot (\alpha_{FSys}^{TK}) \quad (3.20)$$

$$\begin{array}{l} \text{«Betriebsdichte [Trkm/km], [Tr]»} \end{array} \quad {}^{NK}D_{FSys}^{TK} = \frac{({}^{NK}TS_{FSys}^{TK})}{({}^{NK}KM)} \quad (3.21)$$

Der Homogenitätsannahme der Produktionsfunktion folgend, wird die Betriebsleistung des aktuellen Gleichgewichtspunktes anteilig über alle potentiell kompatiblen Fahrzeuge einer Transport- und Netzkategorie verteilt. Dies führt wiederum zu einer „verteilten Betriebsleistung“, Gleichung 3.20, diesmal in Abhängigkeit zu den im Fuhrpark vorhandenen Fahrzeugsystempaketen.

Diese „verteilte Betriebsleistung“ wird auf die Streckenlänge der betrachteten Netzkategorie bezogen, Gleichung 3.21. Dieser „Quotient aus der Betriebsleistung und der Streckenlänge eines Netzes“ entspricht als „Betriebsdichte [...] einem mittleren Durchsatz des Netzes.“ [117] Dabei ist diese „Betriebsdichte“ weiterhin in Abhängigkeit zu den Fahrzeugsystempaketen zu sehen.

Über die Kompatibilitätsmatrix kann die „Betriebsdichte“, wie Gleichung 3.22 zeigt, dem jeweils betrachteten potentiellen Netzsystempaket zugeordnet und über alle kompatiblen Fahrzeugsystempakete aufaddiert werden. Damit ist in der „abhängigen Betriebsdichte“ für eine Transportkategorie die Menge aller Trassen bzw. Zugbewegungen innerhalb einer Zeitperiode zum Zeitpunkt  $t_0$  in Abhängigkeit zur Ausrüstung eines Streckenkilometers mit einem Paket aus Zugbeeinflussungssystemen bestimmt.

$$\text{«abhängige Betriebsdichte [Tr]»} \quad {}^{NK}D_{pNSys}^{TK} = \sum_{FSys} (({}^{NSys}K_{NK}^{TK}) \cdot ({}^{NK}D_{FSys}^{TK})) \quad (3.22)$$

Für die Integration dieser Leistungsdichte in den Kapitalwert, der eine dynamische Betrachtung von Zahlungsströmen einer Investition darstellt, muss diese abhängige Betriebsdichte vom Zeitpunkt  $t_0$  bis zum Ende der Nutzungsdauer in  $t_n$  prognostiziert werden. Dazu kommt eines der beiden eingangs beschriebenen Prognoseverfahren zur Anwendung.

In einem vorletzten Schritt wird die periodische, „abhängige Betriebsdichte“ monetarisiert, Gleichung 3.23. Dabei bestehen prinzipiell die gleichen Probleme wie bei der Monetarisierung der fahrzeugbezogenen Betriebsleistung. Zwar kann auf der ersten Ebene, der direkten Bewertung der Betriebsdichte, der Trassenpreis der betrachteten Infrastruktur als Richtwert gelten. Auf der zweiten Ebene, der Bestimmung des Koeffizienten  $\epsilon_{TK}^{NK}$ , der die entstandenen Einzahlungen schließlich direkt dem Teilsystem der Zugsicherungssysteme zuschlägt, bietet sich jedoch die gleiche Zurechnungsproblematik wie auf der Fahrzeugseite. Somit muss modellexogen für jede Simulation entschieden werden, welcher Anteil der Gesamtproduktivität dem Zugbeeinflussungssystem zugeschrieben werden kann.

$$\text{«Einzahlungen je Transportkategorie [GE]»} \quad {}^{NK}E_{pNSys}^{TK} = ({}^{NK}D_{pNSys}^{TK}) \cdot (\epsilon_{TK}^{NK}) \quad (3.23)$$

$$\text{«(Gesamt-)Einzahlungen [GE]»} \quad E_{pNSys}^{NK} = \sum_{TK} ({}^{NK}E_{pNSys}^{TK}) \quad (3.24)$$

Nach der Bestimmung der Einzahlungen je Transportkategorie und Zeitperiode fließen diese in eine Gesamteinzahlung des betrachteten, potentiellen Netzsystempaketes. Bei dieser Addition der einzelnen Einzahlungen, Gleichung 3.24, wird dem Umstand Rechnung getragen, dass über einen Netzkilometer verschiedene Kategorien von Verkehrsdienstleistungen erbracht werden können, die mit unterschiedlichen Trassenpreisen auf

die Einzahlungen einwirken. Letztlich werden diese Gesamteinzahlungen ebenfalls in die Investitionsentscheidung für jede Ausrüstungsalternative integriert.

### **Abschließende Betrachtung des Kapitalwertes**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Berechnung der Einzahlungen beider Seiten immer auf der Verbreitung von kompatibler Ausrüstung des komplementären Gegenparts, jedoch hierbei jeweils auf verschiedenen Aspekten fußt. Auf der Fahrzeugseite wird ein Verhältnis zwischen der Anzahl der Fahrzeuge und der Größe des kompatiblen Netzes bewertet, wohingegen auf der Netzseite direkt die Anzahl der kompatiblen Fahrzeuge zugrunde gelegt wird. Beide Aspekte des Nutzens werden im Kapitalwert den Auszahlungen als Einzahlungen gegenübergestellt.

Mit der Entwicklung des Kapitalwertes ist ein Kriterium der Vorteilhaftigkeit für eine einzelne Investitionsentscheidung entstanden. Nun liegt die Hypothese nahe, dass das Vorteilhaftigkeitskriterium des Kapitalwertes im Zusammenhang mit der - stabilen - Vorteilhaftigkeit, die durch das Überschreiten einer Kritischen Masse entsteht, gedeutet werden kann. Dass Kritische-Masse-Phänomene bei der Betrachtung von Zugbeeinflussungssystemen prinzipiell relevant sind, hatte bereits Kapitel 2.2.1 angeschnitten.

Die Hypothese einer direkten Verknüpfung zwischen dem beschriebenen Kapitalwert und der Kritischen Masse muss jedoch anhand von zwei Aspekten zurückgewiesen werden.

Der erste Aspekt leitet sich direkt aus der Einordnung der ZBS als bedingte Netzeffektgüter ab, da zur Identifikation der Kritischen Masse einer Systemvariante die Verbreitungen beider Systemkomponenten, fahrzeug- und netzseitig, einbezogen werden müssen und es somit eine einseitige Kritische Masse nicht geben kann. Diese Bilateralität überfordert jedoch den entwickelten Kapitalwert, der explizit auf eine mikroanalytische Einzelbetrachtung einer Seite ausgelegt ist.

Der zweite Aspekt bezieht sich auf die Fahrzeugseite, die bei der Bestimmung des Kapitalwertes mit einem relativen Verhältnis zwischen kompatibler Strecke und Menge der Fahrzeuge arbeitet. Dadurch kann, wenn die Menge der Konkurrenzfahrzeuge relativ klein ist, auch kurzfristig ein Fahrzeugsystem im Sinne des Kapitalwertes vorteilhaft werden, das nur zu einer kleinen Strecke kompatibel ist. Diese temporäre Vorteilhaftigkeit im Sinne des Kapitalwertes ist aber offensichtlich kein Hinweis für das Überschreiten einer Kritischen Masse eines Systems, die auf eine stabile Vorteilhaftigkeit hindeutet.

Somit ist festzuhalten, dass sich die Identifikation der Kritischen Masse einzelner Systemvarianten nicht direkt am Kapitalwert ausrichten kann, sondern entlang der Verläufe der Verbreitungen bzw. der Produktlebenszyklen der Systeme vollzieht. Dabei sollte im Rahmen von explizit auf das Ziel der Identifikation von Kritischen Massen ausgerichteten Simulationsexperimenten nicht primär die Frage im Vordergrund stehen, wie viele ausgerüstete Kilometer oder Fahrzeuge die Kritische Masse bilden. Vielmehr muss untersucht werden, welche strategischen Interaktionen effizient zum gewünschten Migrationsergebnis führen.

In den einzelnen Simulationsszenarien, in denen eine vollständige Migration erreicht wird, kann dann in der anschließenden Auswertung versucht werden, die Größe der installierten Basis der Betriebsmittel zu bestimmen, die als Kritische Masse bezeichnet

werden kann. Die Prognose der Migrationsverläufe ist als die grundlegende Aufgabe des Simulationsmodells anzusehen.

Mit der eben dargelegten Entwicklung der Aus- und Einzahlungen für die Bewertung von Investitionsalternativen mittels des Kapitalwertes ist der Kern des Simulationsmodells umrissen. Dabei sind die theoretischen Grundlagen aus Kapitel 2 sowie das Modellbild aus Kapitel 3 in der Methode des Kapitalwertes zusammengeführt und für die Integration im Modell operationalisiert. Im folgenden Abschnitt wird schließlich die Umsetzung in ein lauffähiges Computermodell skizziert, um dann zur Anwendung des Simulationsmodells an einigen Fallbeispielen zu gelangen.

### 3.5. Integration des Gesamtmodells

Ziel der bisherigen Arbeit war es, die Adoption von Zugbeeinflussungssystemen als die kleinste Einheit eines Produktlebenszyklus zu modellieren und in ein lauffähiges Simulationsmodell zu integrieren.

Dabei formt das Bild des Investitionsprozesses mit dem grundlegenden Entscheidungskriterium des Kapitalwertes den Modellkern. Dieser Modellkern ist durch weitere Module zu ergänzen und schließlich in ein lauffähiges Simulationsmodell zu überführen. Im nächsten Kapitel werden diese zentralen Ergänzungen kurz thematisiert.

Bei der Erweiterung des Modellkerns sind zwei Aspekte primär zu berücksichtigen. Auf der einen Seite setzt der Aufbau des Modells als ein dynamisches Simulationsmodell die Abbildung einer Zeitvariable innerhalb der Modellierung voraus. Auf der anderen Seite, das zeigt der Blick auf die Realität der Entwicklungen und Einflussnahmen im Rahmen eines Lebenszyklus von Zugbeeinflussungssystemen, greift die Abbildung der Entscheidungen durch ein rein ökonomisches Kalkül zu kurz. Diese beiden Aspekte werden in der weiteren Entwicklung als eigenständige Module betrachtet, die den Modellkern zu einem Gesamtmodell ergänzen, Abbildung 3.21.

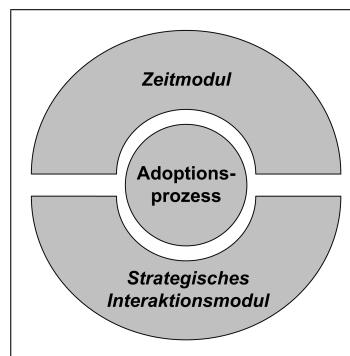


Abbildung 3.21.: Modulkomposition

### 3.5.1. Abbildung des Zeitverlaufs

Die Notwendigkeit eines zusätzlichen Zeitmoduls leitet sich primär aus dem Typ des angestrebten Modells ab, das, wie erwähnt, dynamisch, zeit- und zustandsdiskret sowie deterministisch ist. Dabei findet die Verknüpfung zwischen Zustand und Zeitverlauf über zeitverzugslose Prozesse statt, die die Zustände von Objekten zu definierten Zeitpunkten und/oder durch exogen angestoßene Ereignisse manipulieren. Die Zeit fungiert dabei im Modell als globaler Taktgeber, der in äquidistanten Schritten voranschreitet.

Hierzu muss für jeden Simulationslauf definiert werden, welche Schrittweite und welcher Zeithorizont für die Untersuchung zu benutzen sind. Kersten folgend, wird das Modell insgesamt als prozessorientiert aufgefasst, da interdependente Prozesse Objekte in ihren indikativen und relationalen Attributen manipulieren und somit Zustandsänderungen des Gesamtmodells hervorrufen. In diesem Begriff der Prozessorientierung liegt das Hauptaugenmerk auf einem strukturbeschreibenden, dynamischen und rückgekoppelten Modell als Darstellung des anvisierten realen Systems. [88, S. 17]

Die primäre indikative Zustandsvariable aller Objekte im Modell, sowohl der übergeordneten Betriebsmitteleinheiten als auch der ZBS, ist deren Alter bzw. abgelaufene Nutzungsdauer. Für jede Simulation muss ein Ausgangswert für die Alterszustände aller Objekte definiert werden, der dann während eines Simulationslaufs je Zeitschritt inkrementell erhöht wird.

Wie die Überlegungen zum Investitionsprozess im Kapitel 2.2.2 gezeigt haben, geschieht dessen Anregung zuvorderst durch die Alterung bzw. den Ablauf von exogen vorgegebenen Nutzungsdauern. So wird der Investitionsprozess unmittelbar beim Ersatz von abgängigen Zugbeeinflussungssystemen oder indirekt beim Ersatz von abgängigen Fahrzeugen oder Infrastruktureinheiten initiiert und mit der Installation eines neuen Systems abgeschlossen.

Neben diesen altersbezogenen Prozessen können je Zeitschritt auch exogen definierte Prozesse angestoßen werden, wobei die Auslösung dieser Prozesse ebenfalls an dem globalen Zeittakt orientiert ist.

### 3.5.2. Strategische Interaktionen

Wie bereits angedeutet, wird mit dem Interaktionsmodul dem Sachverhalt Rechnung getragen, dass sich die Entscheidung über die Ausrüstung einer Betriebsmitteleinheit des Bahnsystems, also eines Fahrzeugs oder eines Netzkilometers, in der Realität nicht als reines betriebswirtschaftliches Kalkül auffassen lässt. Vielmehr ist eine Reihe von Akteuren involviert, die unterschiedliche Ziele verfolgen und die Einfluss auf die Ausrüstungsentscheidung ausüben.

So zeigt zum Beispiel das Kapitel 3.3 zu den Zugbeeinflussungssystemen mit den gesetzlichen Vorgaben oder dem europäischen Master- bzw. Migrationsplan einige Einflüsse durch öffentliche Körperschaften auf nationaler und internationaler Ebene auf.

Im Folgenden werden diese Einflüsse systematisiert und in die Modellierung eingebunden. Den Ausgangspunkt bildet dafür der unbeeinflusste Investitionsentscheidungsprozess im Sinne des bis hierhin entworfenen Modells. Dieser wird durch die altersbedingte Ab-

gängigkeit einer übergeordneten Betriebsmitteleinheit oder eines ZBS angestoßen, durch die Investitionsrechnung, die im Ergebnis nur vom aktuellen Modellzustand abhängig ist, entschieden und mit der Installation eines ZBS abgeschlossen.

Alle Einflüsse, die exogen in der Modellierung vorgegeben werden und diesen „reinen“ Entscheidungsprozess beeinflussen, werden im Weiteren als „strategische Interaktion“ bezeichnet. Entlang der Wirkungen auf den Investitionsentscheidungsprozess lassen sich die „strategischen Interaktionen“ weiter differenzieren.

Dadurch entsteht eine erste Gruppe der „strategischen Anregungsinteraktionen“, die den Investitionsprozess jenseits der Alterung initiieren. Dazu gehören auf der einen Seite die modellexogen definierten Interaktionen, die neue Einheiten der übergeordneten Betriebsmitteleinheiten in den Simulationslauf einbringen oder bestehende entfernen. Damit wird zum einen der Gesamtzustand der Betriebsmittel beeinflusst und zum anderen im Zuge einer neu installierten Betriebsmitteleinheit auch eine Ausrüstungsentscheidung über ein ZBS zu dieser Einheit initiiert.

Auf der anderen Seite können in der Gruppe der „strategischen Anregungsinteraktionen“ auch Investitionsprozesse eingeordnet werden, die direkt, modellexogen definiert, zu festgelegten Simulationszeitpunkten zur Ausrüstung von Teilen konkreter Fahrzeug- oder Netzkategorien angestoßen werden.

Die zweite Gruppe wird durch die „strategischen Beeinflussungsinteraktionen“ gebildet. In dieser Gruppe sind strategische Interaktionen zusammengefasst, die einen angestoßenen Investitionsentscheidungsprozess beeinflussen. Zwischen diesen Beeinflussungen ist nochmals in „direkte“ und „indirekte strategische Beeinflussungsinteraktionen“ zu unterscheiden.

In einer „direkten strategischen Beeinflussungsinteraktion“ wird die Entscheidungsfindung, sprich die Investitionsrechnung in der Ausrüstungsentscheidung, vollständig ausgesetzt und die Auswahl sowie die darauf folgende Installation eines ZBS modellexogen determiniert.

Als Beispiel für direkte strategische Beeinflussungsinteraktionen, die zumeist mit einer strategischen Anregungsinteraktion einhergehen, lässt sich der Aufbau von Test- und Pilotstrecken oder die Ausführung von dezidierten Migrationsszenarien anführen, die somit in der Simulation abgebildet werden können.

Dass diese direkten strategischen Beeinflussungsinteraktionen für die Diffusion von Zugbeeinflussungssystemen relevant sind, zeigen die ETCS-Pilotstrecken in Deutschland (Strecke Jüterbog-Halle-Leipzig) [107] oder der Schweiz (Pilotstrecke Zofingen-Sempach) [80] sowie die ETCS-Migrationspläne der SBB für den Gotthard- und Ceneri-Basistunnel [19, S. 12] oder das Migrationskonzept für die Einführung des neuen Sicherungssystems bei der Berliner S-Bahn. [131, S. 29f.]

In der Gruppe der „indirekten strategischen Beeinflussungsinteraktionen“ sind alle Wirkungen zusammengefasst, die die Berechnung des Kapitalwertes als Entscheidungsinstanz nicht vollständig aussetzen, sondern beeinflussen.

Dies kann an zwei Stellen innerhalb der Entscheidungsfindung stattfinden. Zum einen wird unter dem Stichwort der Forderungen der Alternativenraum eingeschränkt, indem entweder bestimmte Systeme oder Systemkombinationen ausgeschlossen oder vorgeschrieben werden oder indem Leistungsparameter vorgeschrieben werden, die bestimmte Sys-

teme als technisch inkompatibel ausschließen. Zum anderen wird unter dem Stichwort der Förderung Einfluss auf die Zahlungsströme einzelner Investitionsoptionen genommen.

Auch für dieses Modellbild der „indirekten strategischen Beeinflussungsinteraktion“ lassen sich zahlreiche Muster in der Realität finden. Zum Beispiel für die Förderungen die Bezuschussung von ERTMS-Projekten<sup>41</sup> durch Gemeinschaftsmittel der EU oder die direkte Übernahme von „außerordentlichen Aufwendungen“ für die ETCS-Fahrzeugausrüstung in der Schweiz [19, S. 15f.]. Auf der Seite der Forderungen können die „ERTMS/ETCS-Umsetzungsregeln“ der Entscheidung 2006/679/EG<sup>42</sup> oder die Allgemeinverfügung des Eisenbahnbundesamtes für die PZB90-Ausrüstung von allen regelspurigen Fahrzeugen<sup>43</sup> genannt werden. Letztere wurde zwar zurückgenommen, kann jedoch als beredtes Beispiel für eine Ausrüstungsvorschrift von Fahrzeugen mit einem bestimmten System gesehen werden, die den Alternativenraum für die eigentlichen Investitionsentscheidungen einschränkt.

Abbildung 3.22 fasst die verschiedenen Formen der strategischen Interaktionen, die in der Modellierung im „strategischen Interaktionsmodul“ berücksichtigt werden, zusammen. Entlang des Investitionsprozesses wird hieraus auch ersichtlich, dass mehrere strategische Interaktionen kombiniert auftreten können.

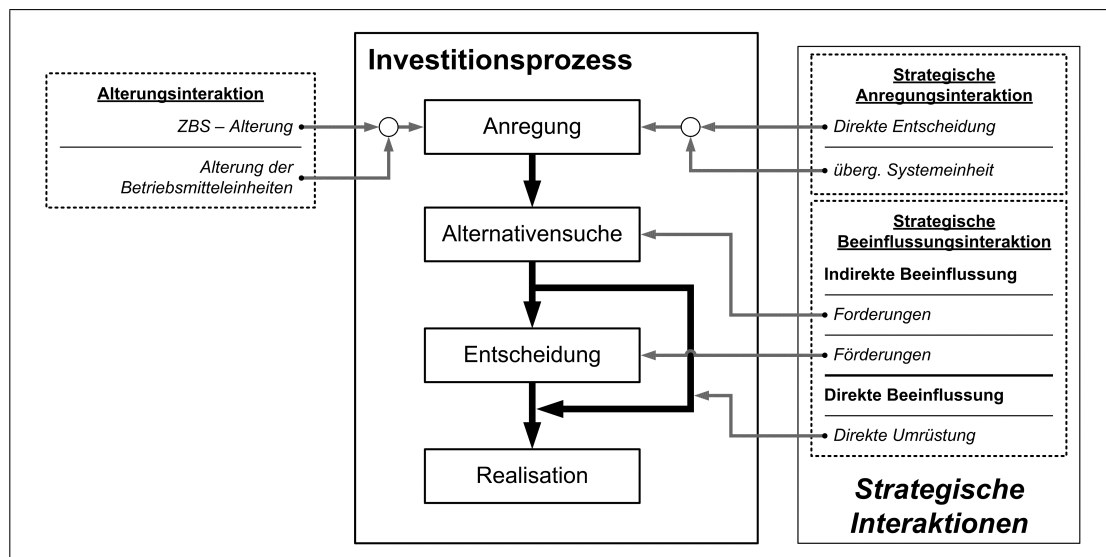


Abbildung 3.22.: Überblick der strategischen Interaktionen

Mit der eben beschriebenen Erweiterung des eigentlichen Modellkerns um strategische Interaktionen eröffnen sich zwei Aspekte für die Modellierung und die Simulationsuntersuchungen. Zum einen wird das Bild, das durch das Modell von der Realität gezeichnet wird, näher an diese herangeführt. Dies geschieht durch die explizite Berücksichtigung

<sup>41</sup> Art. 6 Abs. 2 VO (EG) Nr. 680/2007 [61]

<sup>42</sup> Anhang Kapitel 7.2.2.5. ENT 2006/679/EG [47]

<sup>43</sup> Allgemeinverfügung vom 25.09.2007 „Ausrüstung von führenden Fahrzeugen mit PZB 90“ - Pr 3415 Aut [45]

von Einflüssen, die als zentral in einem Diffusions- bzw. Migrationsprozess von Subsystemen im Eisenbahnsystem angesehen werden müssen.

Zum anderen entstehen mit dieser Modellerweiterung zusätzliche Untersuchungsmöglichkeiten. Vor dem Hintergrund einer unter ökonomisch-rationalen Gesichtspunkten auf der Basis des unbeeinflussten Investitionsentscheidungsprozesses abgelaufenen Migration lassen sich eine Reihe von strategischen Interaktionen in ihrer Wirkung auf die Migration darstellen, untersuchen und bewerten.

Damit kann die bisherige Klassifizierung der Prognose als reine „Entwicklungsprognose“ auf eine „Wirkungsprognose“ erweitert werden, da Instrumentarien der Beeinflussung der Entwicklung in ihrer Wirkung dargestellt und abgeschätzt werden können. [104, S. 36f.]

Letztendlich werden die drei hier dargestellten Module, Modellkern, Zeit- und Interaktionsmodul, in einem Simulationsmodell zusammengeführt und in ein lauffähiges ComputermodeLL umgesetzt. Die konkrete Umsetzung wird in dieser Arbeit nicht näher thematisiert. Lediglich die grundlegende Struktur des Simulationsmodells, aus drei Datenbanken, dem zentralen Simulationsprogramm sowie der interaktiven Simulationsoberfläche, wird im Kapitel 2.3 angeschnitten.

Mit der Umsetzung des konzeptionellen, theoretischen Modells in ein konkretes Simulationsmodell kann die Phase der Modellierung als abgeschlossen betrachtet werden, wobei die „angewandte Validierung“, als ein Teilaspekt der Umsetzung, die Anwendung des Modells weiter begleitet.

Dieser Einsatz des Modells in Simulationsexperimenten zur Untersuchung konkreter Fallbeispiele, bildet einen letzten Schritt auf dem Weg zur Gewinnung von Aussagen über das eigentliche Untersuchungsziel, den Produktlebenszyklus von Zugbeeinflussungssystemen.



## 4. Fallbeispiele

Nach der Entwicklung und Umsetzung des Simulationsmodells wird im folgenden Kapitel an drei Fallbeispielen:

1. der Migration des neuen Zugbeeinflussungssystems „ZBS“ bei der Berliner S-Bahn,
2. der ETCS-Migration in der Schweiz und
3. der ETCS-Migration im gesamteuropäischen Rahmen,

die Anwendbarkeit des Modells demonstriert und diskutiert.

Diese drei Beispiele werden als getrennte Simulationsexperimente verstanden, mit denen teilweise unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt werden. Allgemein können diese Zielsetzungen für die Experimente in den drei folgenden Punkte gefasst werden:

- Darstellung der allgemeinen Anwendbarkeit des Modells,
- Aufzeigen plausiblen Modellverhaltens und
- Anwendung des Modells als Prognosewerkzeug.

Die Darstellung der allgemeinen Anwendbarkeit konzentriert sich auf die Datenaufbereitung und die Abbildungskraft bezüglich realer Szenarien und zieht sich durch alle drei Fallbeispiele. Die Plausibilitätstests betrachten insbesondere die Wirkungen von fiktiven, strategischen Beeinflussungen vor dem Hintergrund von realen Szenarien, um das Modellverhalten hinsichtlich der Realitätsnähe einzuschätzen. Dieses Ziel zieht sich ebenfalls durch alle drei Fallbeispiele, konzentriert sich jedoch auf das jeweils zweite Szenario. Insbesondere im letzten Punkt werden mit dem Modell schließlich Prognosen zur Entwicklung der Produktlebenszyklen von ZBS im jeweiligen Rahmen der Szenarien angestrebt, wobei das zweite und dritte Fallbeispiel den Schwerpunkt dieser Zielsetzung darstellen.

Innerhalb jedes Simulationsexperimentes wird ein Set von Daten zu einem Ausgangsszenario zusammengetragen. Von diesem Szenario ausgehend, werden die Inputdaten variiert, was je Variation zu Szenarien führt, die dann in einzelnen Simulationsläufen simuliert bzw. untersucht werden.

Durch die große Anzahl der Inputvariablen und Parameter, die zum Teil über ihren Definitionsbereich stetig definiert sind, ist prinzipiell eine unendlich große Menge von Szenarien vorstellbar. Um dem zu begegnen, wird der Fokus der Untersuchungen auf die Wirkungen der Interaktionen, also die strategischen Beeinflussungen der Investitionsentscheidungen, gerichtet.

Damit begrenzen sich die Szenarien auf die Abbildung der Handlungsoptionen der zentralen Akteure, die in einer durch die fixen Parameter definierten Welt agieren. Pro Simulationsexperiment werden zwei Szenarien vorgestellt, die zum Ersten eine reale (Migrations-)Situation betrachten und prognostizieren sowie zum Zweiten eine fiktives Szenario vor einem realen Hintergrund simulieren.

## 4.1. Fallbeispiel - „ZBS“-Migration bei der Berliner S-Bahn

Im ersten Fallbeispiel wird die Migration eines neuen Zugbeeinflussungssystems bei der Berliner S-Bahn betrachtet.<sup>1 2 3</sup>

Die Auswahl dieses Fallbeispiel für die Simulation ist damit zu begründen, dass es sich um eine idealtypische Migration eines Zugbeeinflussungssystems handelt. Ein altes Sicherungssystem wird, innerhalb eines geschlossenen Netzes und Fuhrparks, bei laufendem Betrieb komplett durch ein neues System ersetzt.

Den Ausgangspunkt bildet somit die alte mechanische Fahrsperrung, die seit den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts bei der Berliner S-Bahn Anwendung findet. Das gesamte Streckennetz mit seinen rund 331 km sowie der komplette Fuhrpark mit ca. 650 Viertelzügen ist mit diesem System ausgerüstet. [16]

Nachteile dieser alten mechanischen, punktförmigen Zugbeeinflussung hinsichtlich funktionalen, betriebswirtschaftlichen und nicht zuletzt sicherheitstechnischen Aspekten haben letztlich zur Entscheidung geführt, ein neues System zu entwickeln und zu migrieren. [102, S. 65]

Das neue System setzt auf dem europäischen Standard ETCS Level 1 auf, verwendet die zugehörigen Interoperabilitätskomponenten, Lineside Electronic Units (LEU), Eurobalisen sowie optional Euroloops auf der Streckenseite und ein modifiziertes ZUB-System auf der Fahrzeugseite. Dieses System mit dem Namen „Zugbeeinflussungssystem der Berliner S-Bahn“ („ZBS“) ist jedoch mit ETCS in keinem der möglichen Level kompatibel. [6]

### 4.1.1. Zielstellungen des Simulationsexperimentes

Zielstellungen dieses Simulationsexperimentes sind auf der einen Seite ein erster Nachweis der Anwendbarkeit des Modells an realen Daten sowie auf der anderen Seite die Probe des Modellverhaltens auf Plausibilität auch mit fiktiven Daten. Da die Entscheidung über die Einführung eines neuen Systems bereits gefallen ist und dezidierte Migrationspläne bei der S-Bahn bestehen, kommt das Modell nicht als Prognosemodell zur Anwendung, sondern es steht die Abbildung des Migrationsplans im Vordergrund.

Der Nachweis der Anwendbarkeit vollzieht sich im Folgenden in zwei Stufen. Zum Ersten zeigt die Datenaufbereitung für das Ausgangsszenario, ob die benötigten Daten eruiert oder nötigenfalls sinnvoll abschätzbar sind. Zum Zweiten wird mit der Simulation des Migrationsszenarios aufgezeigt, ob das Modell realitätsnahe Einflüsse und Entwicklungen abbilden kann. Im zweiten Szenario wird schließlich explizit das Ziel eines Plausibilitätstests an einem fiktiven Szenario verfolgt.

---

<sup>1</sup>Ausgewertete Literatur u.a. [6]; [16]; [64]; [66]; [100]; [102]; [131]

<sup>2</sup>Gespräche u.a. mit Herrn Groke, S., Institut für Bahntechnik GmbH, Berlin; Herrn Lehmann, U., Siemens AG; Herrn Jakob, Ch., Siemens AG

<sup>3</sup>Tabellen, Übersichten und Diagramme im Anhang ab Seite 135

### 4.1.2. Die Datenaufbereitung für das Ausgangsszenario

Die Datenaufbereitung beginnt mit drei grundsätzlichen Überlegungen zur Abbildung des S-Bahnsystems im Modell.

Erstens wird für das Simulationsexperiment keine Differenzierung des Fuhrparks und des Netzes sowie der Betriebsleistung vorgenommen, womit sich je eine Menge an Fahrzeugen, Streckenkilometern und Betriebsleistung im Sinne des in Kapitel 3.2 entworfenen Potentialdreiecks gegenüberstehen, Abbildung 4.1. Zweitens startet jeder Simulationslauf zum Zeitpunkt  $t = 0$  mit der Vollausrüstung der Netz- und Fahrzeugbestände mit dem alten System. Und drittens wird die Zeitachse in Quartalsschritten bemessen, da die Planungen im Migrationskonzept der Berliner S-Bahn, die das primäre Abbildungsziel der Untersuchung darstellen, mit diesen Zeitschritten operieren.

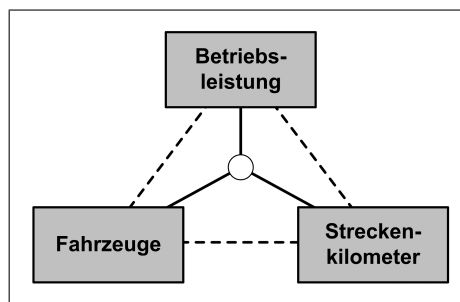


Abbildung 4.1.: S-Bahnsystem als Potentialdreieck

Als konkrete Eingangsdaten müssen die Menge und die Ausrüstung der Fahrzeuge und Streckenkilometer sowie die jeweilige Altersstruktur erhoben werden.

Bei den Fahrzeugen, deren Altersstruktur direkt eruiert werden kann (Diagramm S. 137), ist zu beachten, dass anstelle der 650 Viertelzüge unter Zugrundelegung einer starren 3/4 Zugkonfiguration von 218 vollen Zügen ausgegangen wird. Parallel zum Alter der Fahrzeuge wird auch das Alter der jeweils installierten Zugbeeinflussungssysteme angenommen.

Die Altersstruktur des Netzes bzw. der zugehörigen Sicherungssysteme muss im Gegensatz zu den Fahrzeugen geschätzt werden, da hierzu keine Daten vorliegen. Für die Schätzung der Altersstruktur innerhalb der netzseitigen Zugbeeinflussungssysteme, die zentral für die Entwicklung der Ausrüstung ist, wird eine Normalverteilung mit einem Erwartungswert von 20 Jahren respektive 80 Quartalen sowie einer Standardabweichung von fünf Jahren bzw. 20 Quartalen angenommen. Dies führt schließlich zu einer Altersstruktur der netzseitigen Systeme, wie sie im Diagramm auf der Seite 138 zu sehen ist.

Beiden Sicherungssysteme, die abgängige Fahrsperrung und das neue „ZBS“, werden in der Modellierung auf der Fuhrpark- und der Netzseite jeweils in drei Systempaketen kombiniert, die die eigentlichen Investitionsalternativen darstellen. Die Zusammensetzung dieser Pakete kann den Tabellen Seite 135 entnommen werden.

Hinsichtlich der Systemkompatibilität, die ebenfalls auf Seite 135 festgehalten ist, wird für die Modellierung davon ausgegangen, dass jeweils nur die Netz- und Fahrzeugssysteme kompatibel sind, die einen Systemverbund bilden. Beide Systemvarianten erbringen

jedoch, in der Modellierung, die gleiche Performance, die explizit die Forderungen im Netz erfüllen. Würde eine höhere Leistungsfähigkeit des neuen Systems angenommen, so müssten entweder parallel höhere Forderungen für das Netz erlassen werden, die aber jeglichen Betrieb mit dem alten System unterbinden würden, oder die höhere Leistung des neuen Systems würde an gleichbleibenden Forderungen egalisiert.

Weitere Annahmen betreffen die Nutzungsdauer der Sicherungssysteme bzw. der Systempakete, den Kalkulationszinssatz, die Betriebsleistung, die Höhe der Auszahlungen der einzelnen Systeme sowie die Einzahlungskoeffizienten für Trassen auf der Netzseite und Trassenkilometer auf der Fahrzeugseite.

Die Daten, ersichtlich aus der Tabelle Seite 136, lassen sich, wie die Nutzungsdauer oder die Betriebsleistung, entweder direkt ermitteln oder wie die Einzahlungskoeffizienten entlang des Trassenpreissystems der Deutschen Bahn [34, S. 5] bzw. aus den Verkehrserträgen der Berliner S-Bahn konstruieren [38]. Die Auszahlungen je Systemvariante können dagegen nur in einer ungefähren Größenordnung abgeschätzt werden. Dieses Problem zieht sich durch alle Simulationsexperimente.

Aufbauend auf diesen Daten, die das Ausgangsszenario bilden, werden nun die strategischen Beeinflussungen durch die einzelnen Akteure integriert, die zusammengefasst zu einzelnen Szenarien führen, wovon im Folgenden zwei vorgestellt werden.

#### 4.1.3. Das reale Migrationsszenario

Im ersten Szenario wird versucht, das Migrationskonzept der Berliner S-Bahn in dem Simulationsmodell abzubilden. Dieses Migrationskonzept sieht eine stufenweise Umrüstung des Netzes sowie eine darauf abgestimmte Umrüstung der Fahrzeuge vor.

Für die Simulation werden diese Umrüstungen zeitversetzt als direkte, strategische Beeinflussungsinteraktionen an der kapitalwertbasierten Investitionsentscheidung vorbei operationalisiert. Damit ergeben sich für einen Simulationslauf Ausrüstungsentwicklungen, wie sie aus den Diagrammen auf den Seiten 139 und 140 ersichtlich sind.

In diesen Diagrammen ist ein Simulationshorizont von 40 Quartalen dargestellt. Bis zu diesem Zeitpunkt haben sich die Entwicklungen auf beiden Seiten eingeschwungen.

Auf der Seite des Fuhrparks (S. 139) ist zu erkennen, dass die Gesamtmenge der Fahrzeuge durch Zu- und Abgänge im ersten Teil der Simulation schwankt und um sich nach dem 28. Zeitschritt zu stabilisieren. Nach 27 Zeitschritten ist die Fahrzeugseite vollständig von der Ausrüstung mit dem Systempaket „129“ auf das neue System im Systempaket „257“ umgerüstet.

Auf der Netzseite ist diese Umrüstung (Systempaket „33“  $\mapsto$  Systempaket „65“) nach 26 Zeitschritten abgeschlossen, wobei eine stabile Menge des gesamten Netzkilometer angenommen wird.

Somit ist die Migration nach 6,5 bzw. 6,75 Jahren vollständig abgeschlossen, so wie es das Migrationskonzept für die reale Migration explizit vorsieht.

Im Zusammenhang mit der Simulation dieses Szenarios muss hervorgehoben werden, dass durch die vollständige Planung der Umrüstungen jegliche Freiheitsgrade hinsichtlich der eigentlichen Investitionsentscheidung determiniert sind, und somit der Kern des

Simulationsmodells, die Entscheidung entlang des Kapitalwertkriteriums für die Investitionsalternativen, nicht zur Anwendung kommt.

Vor dem Hintergrund des minimalen Ziels des Tests der Anwendbarkeit ist dieses Szenario dennoch als erfolgreich zu betrachten, da die Abbildung des Migrationskonzeptes der Berliner S-Bahn im Simulationsmodell möglich ist und zu den erwarteten Ergebnissen führt.

#### 4.1.4. Ein fiktives Szenario

Im zweiten Szenario wird die vollständige Determinierung der Investitionsentscheidung aufgehoben und mit der Integration einer alternativen Beeinflussung das zweite Ziel dieses Simulationsexperimentes verfolgt.

Damit steht der Test auf plausibles Modellverhalten im Vordergrund. Aufbauend auf dem Ausgangsszenario, wird eine Vorschrift integriert, die bei jeder Investitionsentscheidung auf der Netz- und der Fahrzeugseite die Integration des neuen Systems zwingend vorschreibt. Statt der direkten kommt nun eine indirekte strategische Beeinflussungsinteraktion zur Anwendung.

Als Hypothese für ein plausibles Verhalten hinsichtlich der Entwicklung der Ausrüstung des Netzes und des Fuhrparks kann angenommen werden, dass es zumindest partiell zu doppelten Ausrüstungen kommt, da der Betrieb jederzeit aufrecht erhalten bleiben muss. Außerdem steht zu erwarten, dass der Migrationszeitraum weitaus länger ist, als im ersten Szenario. Um die vollständige Entwicklung abbilden zu können, wird ein Simulationshorizont von 240 Quartalen betrachtet.

Die Verläufe der Ausrüstungen der Fahrzeug- und der Netzbestände, die den Diagrammen auf den Seiten 141 und 142 entnommen werden können, bestätigen diese Hypothese. Es ist zu erkennen, dass das Netz, da es strukturell älter ist, zuerst umgerüstet wird und dass es hier über einen Zeitraum vom Quartal 1 bis 175 zu einer Doppelausrüstung mit beiden Systemen im Systempaket „97“ kommt.

Diese Doppelausrüstung ist notwendig, da neben dem neuen, durch die indirekte Beeinflussung explizit vorgeschriebenen System auch das alte System zur Aufrechterhaltung des Betriebs vorhanden sein muss, solange es keine oder sehr wenige Fahrzeuge mit dem neuen System gibt.

Im Verlauf des Kapitalwertes der Netzsysteme schlägt sich dies darin nieder, dass der Kapitalwert der Doppelausrüstung größer und somit vorteilhafter als der Kapitalwert des allein stehenden, neuen Systems (Systempaket „65“) ist, Diagramm Seite 144. Die hier vorteilhafteste Alternative, die alleinige Ausrüstung mit dem alten System (Systempaket „33“), steht aufgrund der Vorschrift des neuen Systems nicht zur Auswahl.

Ab dem 40. Quartal setzt, bedingt durch die Altersstruktur des Fuhrparks, die Umrüstung der Fahrzeuge ein. Hierbei ist von Anfang an eine singuläre Ausrüstung mit dem neuen System im Sinne des Kapitalwertes vorteilhaft. Hervorzuheben ist, dass der Kapitalwert des alten Systems fast über die gesamte Laufzeit am größten ist und erst mit dem vollständigen Verschwinden des alten Netzsystems relativ und auch absolut unvorteilhaft wird. (Diagramm S. 143)

Dies kann derart gedeutet werden, dass aufgrund der Doppelausrüstung des Netzes,

also der Nutzbarkeit des alten Fahrzeugsystems, der Vorteil der geringeren Auszahlungen des alten Systems ausschlaggebend wird.

Auf der Netzseite wird es im 55. Quartal, nach der Ausrüstung von 15 % der Fahrzeuge mit dem neuen System, schließlich vorteilhaft lediglich nur noch singuläre Ausrüstungen mit dem neuen System vorzunehmen.

Dies schlägt sich in den nachfolgenden Umrüstungen nieder, so dass die erste Umrüstungswelle, die der angenommenen Altersverteilung im Netz folgt, nach 83 Quartalen mit einer 85 %igen Doppelausrüstung und einer 15 %igen einfachen, singulären Ausrüstung mit dem neuen System endet.

In der zweiten Welle, die nach 120 Quartalen, somit genau nach Ablauf der Nutzungsdauer, einsetzt, wird nur noch das neue System migriert. Den Abschluss findet diese Welle in einer singulären Vollausrüstung im Quartal 176, somit nach 44 Jahren.

Letztlich ist anzumerken, dass die Migration, die Vollausrüstung des Netzes und des Fuhrparks, erst nach 108 Quartalen (ca. 27 Jahren) und mit der Deinstallation der Doppelausrüstung erst nach 176 Quartalen (ca. 44 Jahren) abgeschlossen ist. Dies bestätigt die zweite Eingangshypothese, dass der Migrationshorizont, im Vergleich zu ein abgestimmten Migration weitaus größer ist.

Insgesamt ist für dieses Szenario festzuhalten, dass die Entwicklung der Ausrüstung in der Simulation den Erwartungen aus der Hypothese entspricht, was bedeutet, dass das Modell in diesem Szenario ein plausibles Verhalten zeigt.

Für die Realität ist herauszustreichen, dass eine Migration im Netz und Fuhrpark der Berliner S-Bahn, die lediglich auf einer Umrüstungsvorschrift beruht, weitaus länger dauern und mit der nötigen Doppelausrüstung auch mit höheren Kosten verbunden sein würde und somit als unvorteilhaft abzulehnen ist.

#### **4.1.5. Allgemeine Bewertung**

Für eine allgemeine Bewertung des Simulationsexperimentes ist eingangs auf die Schwierigkeiten hinzuweisen.

Diese ergeben sich auf einer abstrakten Ebene durch das starre Linien- und variable Viertelzugkonzept der Berliner S-Bahn. Diese können im Modell, das für die Verwendung an großräumigen Systemen der Fernbahnen konzipiert ist, nicht direkt umgesetzt werden. Das Viertelzugkonzept wird durch eine Umrechnung in feste Zugeinheiten umgangen und das Linienkonzept geht in der undifferenzierten Abbildung auf.

Die konkrete Ebene betrifft das Problem der Datenbeschaffung, insbesondere hinsichtlich der Altersstrukturen und Ausrüstungen des Fuhrparks und des Netzes sowie der Auszahlungen für Zugbeeinflussungssystemen. Diese Daten können größtenteils nicht eruiert werden und müssen somit als Annahmen in die Simulation einfließen.

Trotz dieser Schwierigkeiten kann das Simulationsmodell erfolgreich angewendet werden und zeigt insbesondere im zweiten Szenario ein plausibles Systemverhalten. Damit ist dieses Simulationsexperiment vor dem Hintergrund der gestellten Ziele als erfolgreich zu betrachten.

Jedoch muss bei der weiteren Arbeit mit dem Modell beachtet werden, dass jeder Test, also auch dieses Simulationsexperiment, im Rahmen der Validierung lediglich einen Ver-

such der Falsifizierung des Modells darstellt. Somit kann, den Ausführungen aus Kapitel 2.3.2 folgend, in der Zurückweisung der Falsifizierung durch das erfolgreiche Experiment nur ein Baustein der Validierung, aber keine Verifikation gesehen werden.

## 4.2. Fallbeispiel - ETCS-Migration in der Schweiz

Analog dazu kann das zweite Fallbeispiel ebenfalls als Baustein der Validierung des Simulationsmodells gesehen werden.<sup>4 5 6</sup>

Dieses zweite Experiment befasst sich mit der Migration von ETCS im Schweizerischen Eisenbahnsystem. Dabei spielt die Schweiz, obwohl nicht in der Europäischen Union und damit nicht direkter Adressat der Liberalisierungspolitik der Europäischen Kommission im Eisenbahnsektor, eine Vorreiterrolle in Europa.

Ziel der Akteure der Schweizerischen Eisenbahn ist es, bis spätestens 2019 drei Hauptverkehrstunnel und eine Neubaustrecke mit ETCS Level 2 sowie das gesamte übrige Normalspurnetz mit ETCS Limited Supervision (LS) auszurüsten.

Diese Vorreiterrolle sowie der überschaubare nationale Rahmen und der sehr gute Zugang zu Daten hinsichtlich Strategie und erreichter Aus- und Umrüstung prädestiniert die ETCS-Migration in der Schweiz als Fallbeispiel für ein Simulationsexperiment.

### 4.2.1. Zielstellungen des Simulationsexperimentes

Im Unterschied zum ersten Fallbeispiel wird mit diesem Simulationsexperiment kein direkter Test der Anwendbarkeit oder des plausiblen Systemverhaltens verfolgt.

Ziel ist es vielmehr, durch den Gebrauch des Modells Aussagen über die Migration und die Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen vor einem realen Hintergrund zu machen. Damit wird der direkte Bereich der Validierung des Modells verlassen und dessen Nutzung als Prognosemodell angestrebt.

Hierbei ist jedoch zu betonen, dass jedes Simulationsexperiment auch immer gleichzeitig einer Validierung gleichkommt. Mit Bezug auf die Diskussion der Modellbegriffe kann hier der Begriff der „angewandten Validierung“ wiederholt werden.

Für das Fallbeispiel der Schweizer ETCS-Migration werden nach der Datenaufbereitung zwei Szenarien vorgestellt.

Das erste Szenario zeichnet den realen Migrationsplan der Schweizer Akteure nach. Da dieser Migrationsplan die Entwicklung weniger determiniert als der Plan der Berliner S-Bahn, bestehen in der Simulation größere Freiheitsgrade hinsichtlich der Entscheidungen für einzelne Ausrüstungen. Somit ist die Simulation statt als reines Abbild eines geplanten Vorgehens als eine Prognose möglicher Entwicklungen zu verstehen.

Im zweiten Szenario wird, wieder vor dem Hintergrund des Ausgangsszenarios, ein vom Migrationsplan abweichendes Ensemble von fiktiven, strategischen Beeinflussungen aufgebaut. Damit handelt es sich um eine rein spekulative Prognose, die jedoch einige Erkenntnisse für die Realität bieten kann.

---

<sup>4</sup>Ausgewertete Literatur u.a. [18]; [19]; [83]; [17]; [141]; [143]

<sup>5</sup>Gespräche u.a. mit Herrn Träger, A., Siemens AG; Herrn Güpfert, St., Siemens AG

<sup>6</sup>Tabellen, Übersichten und Diagramme befinden sich im Anhang ab Seite 145

### 4.2.2. Die Datenaufbereitung für das Ausgangsszenario

Die Grundlage des Simulationsexperimentes stellt das Ausgangsszenario dar, das das Modellbild des Schweizerischen Eisenbahnsystems wiedergibt.

Im Gegensatz zum vorhergehenden Fallbeispiel wird in dieser Simulation eine Differenzierung der Bestände vorgenommen.

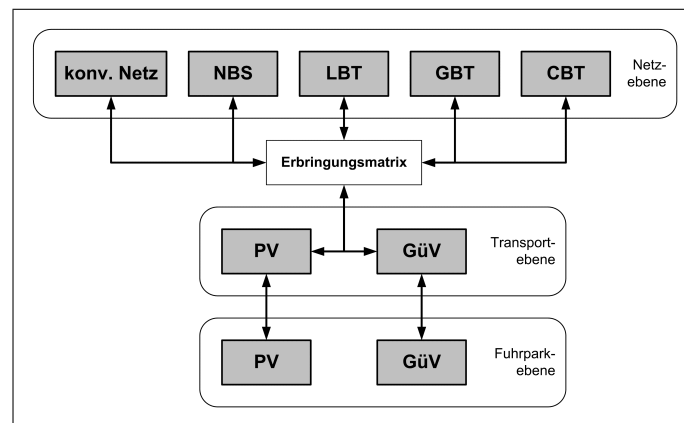


Abbildung 4.2.: Schweizer Eisenbahnsystem als differenziertes Potentialdreieck

So werden zwei Transport- und damit auch zwei Fahrzeugkategorien für den Personen- und Güterverkehr, sowie fünf Netzkategorien gebildet. Die erste Netzkategorie repräsentiert das konventionelle Normalspurnetz der Schweiz. Dahingegen stehen die vier übrigen Kategorien jeweils für eines der vier Projekte, die laut Migrationsplan ausschließlich mit ETCS L2 ausgestattet werden. Es handelt sich in diesem Zusammenhang in der zweiten Kategorien um die Neubaustrecke „Mattstetten-Rothrist“ (NBS) und in der dritten bis fünften Kategorien um die Verkehrstunnel der „Lötschberg-“ (LBT), der „Gotthard-“ (GBT) und der „Ceneri-Basisstrecke“ (CBT).

Als Zugsicherungssysteme werden auf der Netz- und der Fahrzeugseite jeweils vier Systeme berücksichtigt.

Netzseitig werden das System ETCS „Limited Supervision“ (ETCS LS), das System ETCS Level 2 (ETCS L2) sowie ein Klasse-B-System in konventioneller und in einer Ausführung mit Interoperabilitätskomponenten einbezogen. Das herkömmliche Klasse-B-System (SysBL1) steht symbolisch für die Schweizerischen Systeme „ZUB“ und „Signum/Integra“. Die Systeme „EuroZub“ und „EuroSignum“ als die mit Interoperabilitätskomponenten realisierten Klasse-B-Systeme werden durch das vierte System (EuroSys) wiedergegeben.

Unter der Annahme der freien Kombinierbarkeit dieser vier Systeme, ausgenommen eine Kombination von SysBL1 und EuroSys, ergeben sich somit 12 Systempakete. Diese Systempakete stehen auf der Netzseite als Investitionsalternativen zur Verfügung und können der Tabelle c.3 auf Seite 145 entnommen werden.

Analog dazu werden auf der Fahrzeugseite die Systeme ETCS Level 1 (ETCS L1), ein konventionelles Klasse-B-System (SysBL1), ein Transmissionsmodul (ETM) sowie ETCS



Level 2 (ETCS L2) berücksichtigt. Wieder steht das konventionelle Klasse-B-System für die beiden Systeme „ZUB“ und „Signum/Integra“.

Die freie Kombinierbarkeit wird auf der Fahrzeugseite durch den Ausschluss einer ETCS-L1- und L2-Kombination sowie die technisch bedingte Zusammengehörigkeit des ETMs und des SysBL1 eingeschränkt. Dies führt zu acht Systempaketen, die die Tabelle c.2 auf Seite 145 aufführt und die die Investitionsalternativen auf der Fahrzeugseite formen.

Mit dem Transmissionsmodul wird ein Zusatzmodul integriert, das das fahrzeugseitige Klasse-B-System zum EuroSys der Netzseite kompatibel macht. Die weiteren Kompatibilitäten sind der Übersicht c.1 zu entnehmen. Diesen Kompatibilitätsgrößen stehen in der ersten Netzkategorie einer Leistungsforderung von „1“ und in den vier Sonderkategorien von „2“ gegenüber. Dies bewirkt zum einen, dass ohne eine kompatible Systemkombination auf keinem Gleisabschnitt und in den Sonderkategorien gar nur mit einer ETCS-L2-Kombination Betrieb gefahren werden kann.

Für die Altersstruktur der Fahrzeuge und der Streckenkilometer müssen Annahmen in Form von Verteilungen getroffen werden, da keine genauen Daten vorliegen bzw. eruiert werden können.

In dieser Altersverteilung ist auf der Fahrzeugseite neben den beiden Kategorien, Personen- und Güterverkehr, noch zwischen Triebwagen und Lokomotiven zu unterscheiden. Die Triebwagen sind dabei vollständig dem Personenverkehr zuzurechnen, wogegen bei der Aufteilung der Lokomotiven auf einen Schlüssel der „Schweizerischen Bundesbahnen SBB“ zurückgegriffen wird. Bei der SBB werden 40 % der Lokomotiven vorwiegend im Personen- und 60 % vorwiegend im Güterverkehr eingesetzt.

Um die Altersstruktur der Triebwagen und Lokomotiven darzustellen, wird für das Experiment jeweils eine zweigipflige Funktion aus zwei binomialverteilten Wahrscheinlichkeitsfunktionen modelliert. Dabei wird für die Triebwagen eine etwas „jüngere“ Struktur als für die Lokomotiven angenommen. Letztlich führt dies zu zwei Wahrscheinlichkeitsfunktionen bzw. der Altersstrukturen der Fahrzeugkategorien, wie sie das Diagramm Seite 147 widerspiegelt.

Für die Altersstruktur des Netzes wird eine Dichtefunktion der Normalverteilung mit einem Erwartungswert von 20 Jahren und einer Standardabweichung von acht Jahren angenommen. Auf den Bereich der Nutzungsdauer zwischen Null und 30 Jahren normalisiert, entsteht eine Funktion bzw. eine Altersstruktur, die die Darstellung auf Seite 148 zeigt.

Für die übrigen Eingangsdaten sei auf die Tabelle c.4 auf Seite 146 verwiesen.

Als Ausgangspunkt ist noch anzuführen, dass für den Zeitpunkt  $t = 0$ , der ungefähr dem Jahr 2003 entspricht, von einer Vollausrüstung des Netzes und des Fuhrparks mit dem konventionellen Klasse-B-System ausgegangen wird.

Wie bereits in dem Fallbeispiel der S-Bahn werden nun vor dem Hintergrund dieses Modellbildes des realen Schweizer Bahnsystems, die Interaktionen der ausschlaggebenden Akteure nachvollzogen und zu Szenarien zusammengefasst.

### 4.2.3. Das reale Migrationsszenario

Das erste Szenario, das hier vorgestellt wird, empfindet die nationale Migrationsstrategie der Schweiz hinsichtlich ETCS nach. Dabei kann die Strategie, die verfolgt wird bzw. teilweise bereits umgesetzt ist, auf die folgenden Punkte konkretisiert werden:

- Ausrüstung aller Fahrzeuge mit einem ETM (2003-2005),
- Ausrüstung von ca. 580 Fahrzeugen mit einem ETCS-L2-System (2004-2007),
- Vorschrift eines ETMs bzw. vergleichbarer Technik (ZUB262ct) für alle Fahrzeuge (seit 2005),
- Umrüstung des konventionellen Netzes vom SysBL1 auf EuroSys (2007-2014),
- Paralleles Implementieren der ETCS-LS-Software in die Hardware des EuroSys (2012-2017),
- Flankierende Vorschrift zur Verwendung des EuroSys bei Ersatz, Umrüstungen oder Neubauten im Netz (seit 2008),
- Ausrüstung der Strecke „Mattstetten-Rothrist“ (2006) und der „Lötschberg-“ (2007), der „Gotthard-“ (2017) und der „Ceneri-Basisstrecke“ (2019) mit ETCS L2.

Werden diese strategischen Interaktionen in das Migrationsszenario integriert und über einen Zeithorizont von 60 Jahren simuliert, prognostiziert das Simulationsmodell die Verläufe der Ausrüstungsentwicklung der Netzkilometer und Fahrzeuge, wie in den Diagrammen auf den Seiten 149 bis 154 dargestellt. Die ersten Diagramme beider Seiten verdeutlichen jeweils die Gesamtsituation, wohingegen die nachfolgenden Diagramme die einzelnen Kategorien bzw. auf der Netzseite eine Zusammenfassung der zweiten bis fünften Kategorie aufzeigen.

Deutlich zeigt sich in dem Diagramm Seite 153 die Umrüstung der ersten Netzkategorie von der vollständigen Ausrüstung mit dem SysBL1 (Systempaket „17“) über eine Ablösung dieses Systems durch das EuroSys (Systempaket „9“) und schließlich hin zur Doppelausrüstung mit dem EuroSys und dem System ETCS LS (Systempaket „73“). Parallel dazu werden die übrigen Netzkategorien Schritt für Schritt mit ETCS L2 (Systempaket „17“  $\mapsto$  Systempaket „5“) ausgerüstet, siehe Diagramm Seite 154.

Damit wird deutlich, dass das Migrationskonzept der Schweizer Eisenbahn die Umrüstung des Netzes bis zum Zeitschritt 16 (ca. 2019) vollständig determiniert und diese dann als abgeschlossen betrachtet werden kann.

Im Gegensatz dazu schränkt die strategische Beeinflussung die Entwicklung der Fahrzeugseite nicht umfassend ein. Deren Beeinflussung ist nach der zusätzlichen Installation eines ETMs in allen Fahrzeugen (Systempaket „65“  $\mapsto$  Systempaket „81“) und der Ausrüstung von ca. 580 Fahrzeugen mit einem ETCS L2 (Systempaket „89“) bereits zum Zeitpunkt vier (ca. 2007) abgeschlossen.

Ab diesem Zeitpunkt vollzieht sich die Entwicklung der Ausrüstung in der Simulation durch einzelne modellendogene Investitionsentscheidungen auf mikroanalytischer Ebene.

In den Verläufen (Diagramme Seite 149 bis 151) dieser Entwicklung ist zu erkennen, dass das alte Klasse-B-System inklusive des ETMs (Systempaket „81“) sukzessive abgelöst und zunehmend durch das System ETCS L2, erst in einer Doppelausrüstung im

Systempaket „89“ und dann als Einzelsystem im Systempaket „9“ ersetzt wird. Später tritt zu dieser Ausrüstung noch eine Gruppe von Fahrzeugen hinzu, die mit ETCS L1 als Doppelausrüstung im Systempaket „209“ bzw. ab Zeitschritt 40 als Einzelausrüstung im Systempaket „129“ bestückt ist.

Damit zeigt sich, dass in beiden Fahrzeugkategorien eine singuläre Systemausrüstung angestrebt wird, was unter Effizienzgesichtspunkten plausibel erscheint. Dies wird auch in der Entwicklung der Kapitalwerte (exemplarisch Kategorie 1 Diagramm S. 155) deutlich, da hier mit dem Systempaket „9“ bereits nach dem 14. Zeitschritt, also 2017, eine singuläre ETCS-L2-Ausrüstung relativ am vorteilhaftesten ist. Diese Entwicklung ist parallel zur abgeschlossenen Netzausrüstung zu sehen.

In der Bewertung dieser singulären Ausrüstung des Fuhrparks mit ETCS-L2-Systemen ist für die Übertragung in die Realität anzumerken, dass im Modell beide Transportkategorien dadurch gekennzeichnet sind, dass ein fester Bestandteil ihrer Betriebsleistung in den Sonderkategorien des Netzes, die ausschließlich mit ETCS L2 ausgerüstet sind, erbracht wird.

Wird die Differenzierung der Transportkategorien dahingehend verfeinert, dass zwischen rein regionalen Verkehren, die die Sonderkategorien des Netzes nicht nutzen, und nationalen Verkehren, die die Sonderkategorien des Netzes nutzen, unterschieden werden kann, dann steht zu erwarten, dass diese ETCS-L2-Ausrüstungen in ihrem Anteil an der Gesamtausrüstung zu Gunsten einer ETCS-L1-Ausrüstungen an Gewicht verlieren würden.

In den Netzkategorien wird die singuläre Ausrüstung mit ETCS LS erst im Zeitschritt 43 relativ am vorteilhaftesten, was genau mit der Deinstallation der letzten Klasse-B- und ETM-Systeme auf Fahrzeugseite zusammenfällt. Hierzu zeigt das Diagramm auf der Seite 156 exemplarisch die Entwicklung des Kapitalwertes in der ersten Netzkategorie.

Abschließend ist ein Blick auf die Produktlebenszyklen von ETCS auf der Fahrzeug- und der Netzseite zu werfen. Dabei sind bei diesen kumulierten Verbreitungen oder Adoptionen zum einen die zeitlichen Entwicklungen als auch zum anderen die absolut erreichten Adoptionsmengen interessant. Diese absoluten Adoptionsmengen können als Marktsättigungsgrenzen interpretiert werden. Die Verläufe der kumulierten Adoptionen, abgetragen über die Zeit, sind für den Fuhrpark im Diagramm auf Seite 157 und für das Netz im Diagramm auf Seite 158 ersichtlich.

In diesen Diagrammen ist außerdem erkennbar, in welcher Kombination, also welchen Systempaketen ETCS zur Anwendung kommt.

Wiederholt ist dazu anzumerken, dass eine einzelne Adoption sich entweder auf ein Fahrzeug oder einen Streckenkilometer bezieht und eine Neuausrüstung oder Ersatzinvestition nach dem Ablauf der Nutzungsdauer symbolisiert.

In der abschließenden Bewertung dieses Szenarios ist für das Modell festzuhalten, dass durch die korrekte Darstellung des Migrationsszenarios sowie durch das darauf folgende plausible Systemverhalten dieses Szenario als ein erfolgreicher Schritt in der „angewandten Validierung“ betrachtet werden kann.

Wird die Prognose auf die Realität übertragen, ist für die Migration von ETCS im Eisenbahnsystem der Schweiz zu dokumentieren, dass der Migrationsplan auf der Netzseite eine zügige Umrüstung verspricht. Auf der Fahrzeugseite hingegen ist durch die lange

netzseitige Vorhaltung des EuroSys erst nach einer sehr langen Zeit mit dem restlosen Verschwinden der Altsysteme SysBL1 und ETM zu rechnen.

Unter dem Gesichtspunkt des Bestandsschutzes für Investitionen und Systemlösungen ist dies zu begrüßen. Mit Rücksicht auf die Notwendigkeit des sehr langen Vorhaltens von „Know-How“ hinsichtlich Wartung, Ersatzteilmanagement und Softwarepflege für die Altsysteme und der Annahmen, dass Mehrfachausrüstungen zu komplexen Systemarchitekturen und damit zu höheren Ausfallrisiken führen, ist diese Entwicklung jedoch zu kritisieren.

Bei einer Empfehlung einer vorgezogenen Systemablösung des EuroSys muss schließlich zwischen den Kosten einer netzseitigen Doppelausrüstung (EuroSys und ETCS LS) und den Kosten einer Fahrzeugumrüstung abgewogen werden. Im Zuge dieser Abwägung sind Ausgleichsmechanismen vorzusehen, da die Netzseite von einer raschen Ablösung der Doppelausrüstung profitieren, wohingegen die Fuhrparkseite belastet werden würde.

Letztlich wird vorgeschlagen, die zweite Ausrüstungswelle des EuroSys, die im Zeitschritt 33 (2036) als Ersatzwelle einsetzt, nicht durchzuführen bzw. auf eine singuläre ETCS-LS-Ausrüstung (Systempaket „9“) zu begrenzen (siehe Seite 158). Parallel dazu sollte drei Jahre vorher, im Zeitschritt 30, ein Programm gestartet werden, das die verbliebenen 230 Fahrzeuge mit der inkompatiblen Systemkombination SysBL1 und ETM (Systempaket „81“) auf ETCS LS umrüstet. Damit wäre die Migration inklusive der Deinstallation aller Altsysteme bereits nach 33 Jahren, somit 10 Jahre früher, abgeschlossen.

Letztlich könnten durch die Arbeit mit dem Simulationsmodell weitere strategische Eingriffe entwickelt und zu einem Konzept gebündelt werden, die die Migration noch effizienter und/oder schneller gestalten.

#### **4.2.4. Ein fiktives Szenario**

Im zweiten hier vorgestellten Szenario wird eine fiktive Migrationsstrategie vor dem Hintergrund der Forderung nach einem schnellen Systemwechsel betrachtet.

Den Ausgangspunkt formt wiederum das Ausgangsszenario des Schweizer Eisenbahnsystems. Im Gegensatz zum Migrationsszenario wird jedoch diesmal kein konzertiertes Migrationskonzept verfolgt, sondern die fiktive Migrationsstrategie setzt sich in diesem Szenario aus den folgenden Schritten zusammen.

Zum Ersten werden auf der Netzseite die vier herausgehobenen Streckenabschnitte allein mit ETCS L2, also dem Systempaket „5“ ausgerüstet, wobei dem gleichen Zeitplan gefolgt wird, der auch dem realen Migrationsplan zugrunde liegt.

Zum Zweiten werden 550 Kilometer des konventionellen Netzes, somit der ersten Netzkategorie, parallel zur bestehenden Ausrüstung mit dem System ETCS LS ausgestattet. Diese 550 Kilometer entsprechen in etwa dem Anteil der Schweiz an der europäischen Eisenbahnachse Nummer 24 [57, S. 94], die seit einem „Memorandum of Understanding“ zwischen der europäischen Kommission und der European Railway Association (CER, EIM, UIC, Unife) im Jahr 2005 den Eisenbahngüterkorridor A bildet und zu einem Netz von sechs Korridoren gehört. Diese Eisenbahngüterkorridore, Streckenabschnitte mit besonderer Bedeutung für den europäischen Güterverkehr, sollen beschleunigt mit ETCS/ERTMS interoperabel gestaltet werden.

Weitere netz- oder fuhrparkseitige Vorgaben werden in diesem fiktiven Simulationsszenario nicht erhoben. In der Gesamtheit können in diesem Vorgehen Parallelen zu anderen nationalen Migrationsplänen gesehen werden, die ebenfalls darauf abzielen, ausschließlich die Korridore interoperabel auszurüsten und das restliche Netz nicht in eine Migrationsstrategie einzubinden.

Der Aspekt, der in diesem Simulationsszenario insbesondere betrachtet werden soll, ist die Frage, ob es zu einer vollkommenen Umrüstung des Netzes kommt und, falls es zu einer Migration von ETCS kommt, wie lange diese insgesamt dauern wird.

Die Entwicklungen der Ausrüstungen in der Simulation können für den Fuhrpark und das Netz den Diagrammen auf den Seiten 159 bis 164 im Anhang entnommen werden. Dabei wird ein Simulationshorizont von 120 Jahren betrachtet, da sich insbesondere auf der Fahrzeugseite erst ab 100 Zeitschritten ein stationärer Zustand herausgebildet hat.

Auffällig erscheint auf den ersten Blick, dass keine Ausrüstung der Netzseite mit dem EuroSys sowie der Fahrzeugseite mit dem ETM-Modul realisiert wird. Dazu ist zu vermuten, dass die bloße Interaktion der Fahrzeug- und der Netzseite über den Trassenmarkt nicht ausreicht, um derartige Lösungen, die eines abgestimmten Vorgehens bedürfen, zu entwickeln und umzusetzen. Es bedarf damit als Anstoß auf mindestens einer Seite einer Ausrüstung mit dem betreffenden System, der aber als strategische Beeinflussung jenseits der reinen Investitionsentscheidung zu werten ist.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Fahrzeugseite Schritt für Schritt mit einem ETCS-L2-System parallel zum konventionellen SysBL1 (Systempaket „73“) ausgerüstet wird, bis nach ca. 30 Jahren die vollständige Umrüstung erfolgt ist. Im weiteren Verlauf erfährt das alte Klasse-B-System als alleinige Ausrüstungsvariante (Systempaket „65“) sogar nochmals einen Renaissance, um schließlich nach 101 Zeitschritten bzw. Jahren in beiden Fahrzeugkategorien endgültig deinstalliert zu werden.

Die Chronologie der Ausrüstungsentwicklung der Netzseite erklärt das lange Verbleiben der alten Systemausrüstung auf der Fahrzeugseite. So wird hier erst nach 30 Jahren eine Umrüstung des Netzes, neben dem Korridorabschnitt und den herausgehobenen Kategorien, eingeleitet. Dazu wird das Altsystem SysBL1 (Systempaket „17“) durch das System ETCS LS (Systempaket „65“) ersetzt. Diese Umrüstung ist schließlich nach 67 Jahren also im Jahr 2070 abgeschlossen.

Neben der sehr langen Umrüstungsdauer ist zu bemerken, dass auf der Netzseite so gut wie keine doppelte Systemausrüstung zur Anwendung kommt. Ausgeglichen wird dies durch eine annähernd 100 %igen Doppelausrüstung der Fahrzeugseite, die über einen langen Zeitraum aufrechterhalten bleibt.

Beispielhaft soll hier das Jahr 30 herausgegriffen werden. In dem realen Migrationsszenario sind zu diesem Zeitpunkt 36 % der Fahrzeuge mit vollwertigen Systemen doppelt ausgerüstet. Dagegen sind im fiktiven Szenario 99 % der Fahrzeuge mit zwei vollwertigen Systemen ausgerüstet. Dabei ist das ETM, das als Zusatzelement lediglich Übersetzungsfunktion hat, nicht als vollwertiges System zu werten.

In den Verläufen der Kapitalwerte, die jeweils für den Fuhrpark und das Netz den Seiten 165 bis 167 entnommen werden können, lässt sich diese Entwicklung ebenfalls nachvollziehen.

Auf der Netzseite wird im Zeitschritt 39 die singuläre Ausrüstung mit dem konven-

tionellen Klasse-B-System (Systempaket „17“) durch die singuläre Ausrüstung mit dem System ETCS LS (Systempaket „65“) als dauerhaft vorteilhaft abgelöst.

Auf der Fahrzeugseite dagegen ist die Doppelausrüstung mit einem Klasse-B-System und ETCS Level 2 (Systempaket „73“) bis zum Zeitschritt 64 vorteilhaft und wird erst dann durch die singuläre Ausrüstung mit ETCS L2 (Systempaket „9“) als vorteilhaftes System abgelöst.

Für die Bewertung des fiktiven Szenarios spielt diese langanhaltende Doppelausrüstung eine herausragende Rolle, da sie neben doppelten Investitionsauszahlungen auch doppelt bei der Instandhaltung, dem Betrieb sowie der Systempflege zu Buche schlägt.

In der Einschätzung der sich durchsetzenden Ausrüstung mit dem ETCS-L2-System auf der Fahrzeugseite muss jedoch der Einwand aus dem Migrationsszenario wiederholt werden. Durch die bloße Unterscheidung in Personen- und Güterverkehr ohne eine weitere Differenzierung in regionale und nationale oder gar internationale Verkehre ist die Verbreitung von ETCS L2 strukturell begünstigt, da die Bedeutung der vier Netzkategorien, die ausschließlich mit ETCS L2 ausgerüstet sind, überzeichnet wird.

Um zu einer abschließenden Bewertung dieses Szenarios, das eine Migration von ETCS mit minimalen Eingriffen betreibt, zu gelangen, müssen Ziele für diese Migration definiert werden.

Wird davon ausgegangen, dass eine Migration grundsätzlich als Ziel anzusehen ist, kann festgehalten werden, dass diese minimalistische Vorgehensweise zum Erfolg führt, da es sowohl im Netz als auch im Fuhrpark zu einer vollständigen Ausrüstung mit ETCS als alleiniges System kommt. Wird dagegen eine schnellstmögliche Migration angestrebt, ist ein derartiges Migrationskonzept nicht vorteilhaft, da die vollständige Ausrüstung mit ETCS im Fuhrpark erst nach 33 Zeitschritten und im Netz sogar erst nach 66 Zeitschritten abgeschlossen ist. Wird eine kostenoptimale Migration anvisiert, können für diesen Migrationsverlauf lediglich Vorteile auf der Netzseite festgestellt werden.

Auf der Fahrzeugseite hingegen kommt es zum Ersten zu Verwerfungen hinsichtlich der Befahrbarkeit des Netzes, was sich in den Ausschlägen der Kapitalwerte in den ersten 15 Zeitschritten der Simulation zeigt. Diese Ausschläge signalisieren, dass es ein Missverhältnis zwischen der Ausrüstung der Strecke und den hierzu kompatiblen Fahrzeugen gibt. Zum Zweiten kommt es zu kostspieligen Doppelausrüstungen.

Wird weiterhin für die Netzseite in Betracht gezogen, dass das EuroSys als Ablösung des alten Klasse-B-Systems sehr kostengünstig die parallele Vorhaltung des Systems ETCS LS sicherstellt, sowie dass die netzweite ETCS-LS-Ausrüstung sich trotzdem, lediglich später, vollzieht, kann auch der klare Kostenvorteil der Netzseite in Zweifel gezogen werden.

Damit ist die Vorgehensweise zwar prinzipiell eine Migrationsstrategie, da es zu einer vollständigen Umrüstung kommt. Verglichen mit der realisierten Migrationsstrategie der Schweizer Eisenbahnen, ist sie aber weder schneller noch kostengünstiger und damit abzulehnen.

#### 4.2.5. Allgemeine Bewertung

Das Fallbeispiel der Schweizer Eisenbahn zeigt, dass das Simulationsmodell auf reale Eisenbahnsysteme in einem nationalen Rahmen anwendbar ist und plausible Ergebnisse liefert. Außerdem beweist dieses Simulationsexperiment, dass mit dem Modell, wie bereits in Kapitel 3.5.2 angedeutet, neben reinen „Entwicklungsprognosen“ auch „Wirkungsprognosen“ hinsichtlich der strategischen Beeinflussungen möglich sind.

Dies eröffnet für die Arbeit mit dem Modell die Möglichkeit, verschiedene Migrationsstrategien, die als Bündel mehrerer strategischer Beeinflussungen aufgefasst werden, zu simulieren und in ihren Wirkungen miteinander zu vergleichen.

Im ersten Szenario ist es Ziel, die tatsächliche Migrationsstrategie der Schweizer Eisenbahn darzustellen und in ihrer Wirkung zu prognostizieren. Hierbei kann das Modell, mit den strategischen Aktionen, die die Akteure des Schweizer Eisenbahnsystems eingeleitet haben, erfolgreich die bereits realisierte Entwicklung im realen System bis zum aktuellen Zeitpunkt abbilden. Über diesen Zeitpunkt hinaus produziert das Simulationsmodell plausible Entwicklungen in den Verläufen der Verbreitungen der Systeme, wobei die endgültige Prüfung der „prognostischen Gültigkeit“ dieser Daten, wie bereits mehrmals angesprochen, erst am Ende des Zeithorizonts erfolgen kann und muss.

Das zweite Szenario, das als rein fiktives Migrationsszenario konzipiert ist, liefert ebenfalls, insbesondere vor dem Hintergrund des ersten Szenarios, plausible Ergebnisse. Da es sich jedoch um rein fiktive Annahmen der Migration handelt, wird die letzte Prüfung der „prognostischen Gültigkeit“ nicht möglich sein.

In der Übertragung der Ergebnisse auf die Realität ist zum einen herauszustreichen, dass das Migrationskonzept der Schweizer Eisenbahnen zu einer vollständigen und zügigen Migration von ETCS LS führt und damit zunächst als erfolgreich eingestuft werden kann. Zum anderen deutet sich, mit Bezug auf die Doppelausrüstungen an, dass diese einen negativen Einfluss auf die Geschwindigkeit einer Migration haben, da sie einen Teil des Drucks, in Form von Umrüstungszwang, auf den jeweiligen Gegenpart kompensieren.

Wird eine schnellst mögliche Migration angestrebt, sollte die Dauer einer Doppelausrüstung beschränkt werden und ein Ausgleichsmechanismus geschaffen werden, der die Vor- und Nachteile zwischen den Seiten Fuhrpark und Netz austariert.

Abschließend sind insgesamt auch diese Simulationsexperimente als erfolgreiche Bausteine in der Validierung des Simulationsmodells und als erfolgreiche Anwendungen des Modells als Prognosewerkzeug anzusehen.

### 4.3. Fallbeispiel - ETCS-Migration in Europa

Als drittes Fallbeispiel wird ein Simulationsexperiment erörtert, das die europaweiten Migration von ETCS abbildet und prognostizieren soll.

In diesem Experiment werden, von einem gesamteuropäischen Eisenbahnsystem ausgehend, wiederum zwei Szenarien vorgestellt.

Im ersten Szenario werden Migrationsaktivitäten, die auf internationaler Ebene vorwiegend in Vorschriften sowie auf nationaler Ebene in konkreten Um- und Ausrüstungsprojekten bestehen, in das Ausgangsszenario integriert und in ihrer Wirkung in die Zukunft

projiziert.

Im zweiten Szenario wird den bestehenden Migrationsplänen eine zusätzliche Migrationsvorschrift hinzugefügt und damit in ihrer direkten Wirkung vor dem Hintergrund des ersten Szenarios prognostiziert und untersucht.

#### 4.3.1. Zielstellungen des Simulationsexperimentes

Ziel der Fallbeispiele ist es, die Entwicklungen im gesamteuropäischen Rahmen seit 2003 nachzuvollziehen und in die Zukunft zu prognostizieren.

Im Zentrum steht dabei die Frage, ob die erreichten Ausrüstungsstände und die angestoßenen Aktivitäten für eine vollständige Migration von ETCS in das europäische Eisenbahnsystem ausreichend sind. Zusätzlich stellt sich dabei natürlich die Frage, wann diese Migration vollständig abgeschlossen oder zumindest signifikant fortgeschritten sein wird.

#### 4.3.2. Die Datenaufbereitung für das Ausgangsszenario

Der erste Schritt nach der Zieldefinition ist für das Simulationsexperiment wiederum die Aufbereitung der nötigen Daten in einem Ausgangsszenario, das die Grundlage für die eigentlichen Simulationsszenarien bildet.<sup>7 8</sup>

Für das Fallbeispiel wird das gesamteuropäische Netz in drei Kategorien differenziert, ein konventionelles Netz, das durch die Kategorie „1“ repräsentiert wird, das Netz der sechs Eisenbahngüterkorridore, abgebildet in der Kategorie „2“ und das Hochgeschwindigkeitsnetz, Kategorie „3“. Die Fahrzeuge und die Betriebsleistung hingegen werden in Personen- und Güterverkehr, somit zwei Kategorien, gegliedert.

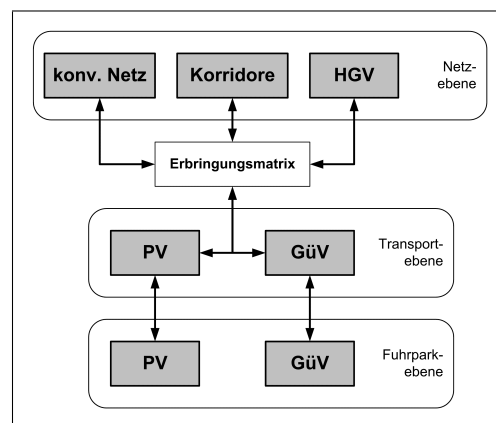


Abbildung 4.3.: Europäisches Eisenbahnsystem als differenziertes Potentialdreieck

Als Zugbeeinflussungssysteme werden sowohl auf der Fahrzeug- als auch auf der Netzseite vier Systeme integriert. Zum einen ETCS Level 1 (ETCS L1) und Level 2 (ETCS

<sup>7</sup> Ausgewertete Literatur u.a. [53]; [49]

<sup>8</sup> Tabellen, Übersichten und Diagramme befinden sich im Anhang ab Seite 170



L2) sowie als Platzhalter für punktförmige Klasse-B-Systeme SysBL1 und für kontinuierliche Klasse-B-Systeme SysBL2. Durch die freie Kombinierbarkeit, mit Ausnahme der gleichzeitigen Integration von ETCS Level 1 und Level 2 in einem Fahrzeug oder einem Kilometer, ergeben sich fahrzeug- und netzseitig jeweils 12 Systempakete als Investitionsalternativen.

Die Zusammensetzung dieser Systempakete kann den Tabellen auf Seite 170 entnommen werden. Hier sind außerdem die Kompatibilitäten der Systemverbünde ersichtlich, wobei für die punktförmigen Systeme ein Leistungslevel von eins und für die kontinuierlichen Systeme ein Leistungslevel von zwei angenommen wird. Dem stehen Forderungen von eins in den Netzkategorien „1“ und „2“ sowie eine Leistungsforderung von zwei in der Netzkategorie „3“ gegenüber. Damit ist ein Betrieb ohne Zugbeeinflussungssysteme für alle Netzkategorien ausgeschlossen und in der Hochgeschwindigkeitskategorie an einen kontinuierlichen System gebunden.

In der Ausrüstung der Fahrzeuge zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird im Ausgangsszenario davon ausgegangen, dass 80 % der Fahrzeuge im Personenverkehr und 90 % der Fahrzeuge im Güterverkehr ausschließlich mit dem SysBL1 (Systempaket „65“) und der Rest zusätzlich mit SysBL2 (Systempaket „69“) ausgerüstet sind. Damit sind beide Kategorien vollständig mit einem oder mehreren Zugbeeinflussungssystemen ausgerüstet.

Dagegen wird im Netz in der Kategorie „1“ von einer 90 %igen und in der Netzkategorie „2“ von einer 100 %igen Ausrüstung mit SysBL1 (Systempaket „17“) ausgegangen. In der dritten Netzkategorie, dem HGV-Netz, wird eine 100 %ige Doppelausrüstung mit SysBL1 und SysBL2 angenommen (Systempaket „19“).

Die weiteren Daten, wie der Kalkulationszinssatz, die Nutzungsdauer, Einzahlungskoeffizienten sowie die Auszahlungen, sind an das Schweiz-Szenario angelehnt und können der Tabelle d.4 auf Seite 171 entnommen werden.

Die Altersstrukturen der Fahrzeugkategorien und der Netzkategorie „1“ sind, analog zum Fallbeispiel der Schweizer Eisenbahnen, mittels zweier binomialverteilter Wahrscheinlichkeitsfunktionen für die Fahrzeuge und einer normalisierten Dichtefunktion der Normalverteilung für das Netz abstrahiert. Die Altersverteilung der HGV-Netz-Kategorie konnte direkt erhoben werden. Da die Netzkategorie „2“, die Korridorkategorie, ausschließlich direkt umgerüstet wird, die Altersstruktur somit für die Systemausrüstung keine Rolle spielt, wird hier keine differenzierte Struktur angenommen. Die Diagramme auf den Seiten 173 und 174 illustrieren diese Strukturen für die Netz- und die Fahrzeugseite.

In der Zusammenschau ist damit ein Modellbild des europäischen Eisenbahnsystems entstanden, in das nun im zweiten Schritt die beiden Szenarien mit ihren Migrationskonzepten integriert werden.

### 4.3.3. Das reale Migrationsszenario

Wie bereits angesprochen, ist das Ziel des ersten Szenarios die Abbildung der bisherigen Entwicklung sowie die Prognose der Migration von ETCS unter Zugrundelegung der realen, bis jetzt verfolgten bzw. absehbaren Migrationsstrategie.

Dabei wird in dieser Strategie zum Ersten, der Entscheidung 2006/679/EG<sup>9</sup> folgend, für alle HGV-Strecken die Nutzung von ETCS vorgeschrieben. Zum Zweiten wird, den europäischen Vereinbarungen zu den Eisenbahngüterverkehrskorridoren folgend, in der Netzkategorie „2“ eine Vorschrift für die Ausrüstung dieser Strecken mit ETCS integriert. Parallel dazu werden zum Dritten direkte Umrüstungsaktionen in der Netzkategorie „2“ berücksichtigt, so dass die gesamte Kategorie bis zum Zeitschritt 17 (ca. 2020) vollständig mit ETCS L1 ausgerüstet ist.

Weiterhin werden eine Reihe von einzelnen ETCS-Projekten als direkte Umrüstungen bzw. Neubauten im Szenario realisiert, die im Einzelnen mit den jeweiligen Realisierungsdaten in der Tabelle d.5 auf der Seite 172 aufgeführt sind.

Zusätzlich werden auf der Fahrzeugseite Aus- und Umrüstungsinteraktionen veranlasst, so dass bis zum Zeitschritt fünf (ca. Ende 2007) ca. 1000 Fahrzeuge mit ETCS ausgestattet sind.

Als letzte konkrete Annahme werden die Ausrüstungsbestrebungen der Schweiz, die voraussichtlich bis zum Jahr 2017 zu einer interoperablen Ausrüstung des gesamten Schweizer Netzes, ca. 5000 km, führen, in das Szenario integriert.

In der Zusammenführung bilden die eben beschriebenen Maßnahmen das Migrationskonzept, das der europaweiten Einführung von ETCS zugrunde liegt und das in diesem Simulationsszenario betrachtet wird. Dazu werden diese Eingangsdaten und die strategischen Interaktionen über einen Zeitraum von 40 Jahren bzw. 40 Zeitschritten simuliert.

Für die Beschreibung der Ergebnisse kann vorweg genommen werden, dass es über den gesamten Zeithorizont zu keiner vollständigen Migration von ETCS sowohl auf der Fahrzeug- als auch auf der Netzseite kommt. Die Verläufe der Ausrüstungen können den Diagrammen auf den Seiten 175 bis 181 entnommen werden.

Das Verfehlen der Migration schlägt sich insbesondere in der größten Netzkategorie „1“, dem konventionellen Netz, nieder (S. 179). Bis zum Zeitschritt fünf werden 1787 Kilometer mit ETCS L1 bzw. L2 (Systempakete „49“ & „21“) ausgerüstet. Diese ETCS-Ausrüstung wächst in den darauf folgenden Schritten und erreicht im Zeitschritt 15 mit 7768 Kilometern oder 3,8 % des Gesamtbestandes der Kategorie einen Höchststand, um dann ab dem Zeitschritt 27 wieder bis auf 2969 Kilometer oder 1,46 % am Ende des Simulationshorizonts abzunehmen. Hervorzuheben ist dabei, dass ETCS jeweils nur als Doppelausrüstung neben dem SysBL1 zur Anwendung kommt.

In der zweiten Netzkategorie (S. 180) werden durch direkte Umrüstungsaktionen bis zum Zeitschritt fünf 701 Kilometer parallel zum SysBL1 mit ETCS Level 2 (Systempaket „21“) ausgerüstet. Da in dieser Netzkategorie eine Ausrüstungspflicht besteht sowie direkte Ausrüstungsanstrengungen unternommen werden, wird bis 2020 also dem Zeitschritt 17 eine komplette Ausrüstung der Kategorie mit ETCS erreicht. Dabei dominiert das Systempaket „49“ mit dem System ETCS L1, mit dem ab Zeitschritt 34 die gesamte Kategorie ausgestattet ist. Wieder ist herauszustreichen, dass es sich bei dieser ETCS-Ausrüstung zu 100 % um eine Doppelausrüstung handelt.

In der dritten Netzkategorie (S. 181) des Hochgeschwindigkeitsverkehrs, die bis zum Zeitpunkt 12 kontinuierlich auf insgesamt 7256 Kilometer anwächst, sind bis zum Zeit-

---

<sup>9</sup> Anhang Kapitel 7.2.2.5 ENT 2006/679/EG [47]

schritt fünf 1980 Kilometer mit ETCS L2 in den Systempaketen „5“ und „7“ ausgerüstet. Dabei basiert die singuläre Ausrüstung von 910 Kilometern mit ETCS L2 (Systempaket „5“) auf neu gebauten Kilometern, die direkt ohne Investitionsentscheidung mit dem Systempaket ausgerüstet werden.

Bis zum Prognosehorizont wird die gesamte Kategorie, analog zur Kategorie „2“, zu 100 % mit ETCS Level 2 ausgerüstet, wobei sowohl die singulären Ausrüstungen mit ETCS L2 als auch mit SysBL2 (Systempaket „5“ & Systempaket „3“) ab dem Zeitschritt 33 vollständig durch Doppelausrüstungen (Systempaket „7“ & Systempaket „23“) ersetzt werden. Wie bereits in den beiden anderen Kategorien ist diese 100 %ige Doppelausrüstung als charakteristisch herauszustreichen.

Auf der Fahrzeugseite sind in der Kategorie „1“ (S. 176), dem Personenverkehr bis zum 5. Zeitschritt 619 Fahrzeuge mit ETCS ausgerüstet, wobei der überwiegende Teil wiederum aus Doppelausrüstungen in den Systempaketen „73“ und „77“ besteht. Im Zuge der weiteren Entwicklung wächst der Anteil des Systempaketes „73“ auf 4287 Fahrzeuge, des Systempaketes „77“ auf 114 Fahrzeuge und des Systempaketes „9“ auf 193 Fahrzeuge. Zusätzlich tritt ab dem Zeitpunkt neun das Systempaket „13“ mit bis zu 5753 Fahrzeugen hinzu, so dass zum Zeitpunkt 25 eine maximale ETCS-Ausrüstung von 10347 Fahrzeugen oder 42 % des gesamten Fahrzeugbestandes erreicht wird. Am Ende des Prognosehorizonts sinkt dieser Anteil jedoch wieder auf 7559 Fahrzeuge.

Damit sind am Ende des Prognosehorizonts zwar 31 % der Fahrzeuge mit ETCS ausgestattet, jedoch kann auch hier von keiner Vollausrüstung gesprochen werden, zumal der Trend für die weitere Entwicklung auf eine weitere Abnahme hindeutet. Außerdem muss explizit auf die 100 %ige Doppelausrüstung der Fahrzeuge hingewiesen werden, die zeigt, dass die alleinige Ausrüstung mit ETCS im Sinne des Kapitelwertes als nicht vorteilhaft erscheint.

Noch gravierender, im Sinne der Verfehlung einer erfolgreichen Migration von ETCS, zeigt sich die Entwicklung in der zweiten Fuhrparkkategorie. Im Zeitschritt fünf weist diese Kategorie 335 Fahrzeuge mit einer ETCS-Ausrüstung (Systempakete „73“ & „9“) auf. Dieser Bestand steigt bis zum Zeitschritt neun auf 1714 Fahrzeuge, was einem Anteil von 8 % am gesamten Fuhrpark dieser Kategorie entspricht. Mit Erreichen des Prognosehorizonts im Zeitschritt 40 ist jedoch keines der Fahrzeuge mehr mit ETCS ausgerüstet.

In einer Bewertung dieses Szenarios vor den beiden Zielen, der Abbildung der bereits erfolgten Migration sowie der Prognose der zukünftigen Entwicklung, ist ein zweigeteiltes Urteil zu fällen.

Die Abbildung des Migrationsstandes, wie er in der Realität bis dato erreicht worden ist, stellt wie schon in den vorangegangenen Szenarien kein Problem dar. Jegliche Interaktionen können nachempfunden werden, so dass sich zum aktuellen Zeitpunkt realistische Bestände an ausgerüsteten Fahrzeugen und Streckenkilometern in der Simulation ergeben.

Mit Bezug auf die Migration von ETCS über den gesamten Zeithorizont ist einfach festzuhalten, dass sie nicht stattfindet, als Gründe hierfür mehrere Punkte angeführt werden müssen:

Negative Auswirkungen auf die Migration hat zum Ersten die Nichtausrüstung großer Teile der Netzkategorie „1“, da beide Fahrzeugkategorien hier den Hauptteil ihrer Betriebs-

leistung erbringen und somit die Ausrüstung dieser Kategorie einen starken Einfluss auf die Fahrzeugausrüstung besitzt.

Zum Zweiten hat die ausschließliche Doppelausrüstung der Netzteile mit ETCS und konventionellen Systemen eine negative, hemmende Wirkung auf die Migration, da sie den Druck auf den jeweiligen Gegenpart mindert, die Ausrüstung ebenfalls umzustellen. Diese migrationshemmende Wirkung hatte sich bereits im Simulationsexperiment der Schweizer Eisenbahnen angedeutet und findet in diesem Szenario eine offensichtliche Bestätigung.

Zum Dritten muss die fehlende Beeinflussung der Fahrzeugseite als negativer Aspekt für die Migration von ETCS gewertet werden, wobei sich Punkt zwei und drei gegenseitig verstärken und letztlich die Migration von ETCS scheitern lassen.

Als Vorschlag für eine Beeinflussung der Fahrzeugseite im Sinne des Vorantreibens einer Migration von ETCS kann exemplarisch wieder die Schweiz hinsichtlich der forcierten ETM- oder ETCS-L2-Ausrüstung angeführt werden. Jedoch muss bei diesem Vergleich der begrenzte nationale Rahmen der Schweiz berücksichtigt werden, der eine derartig konzentrierte Migrationsstrategie erst ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in dem hier vorgestellten Szenario mit den integrierten strategischen Interaktionen keine Migration von ETCS im Sinne einer vollständigen Ausrüstung des Gesamtsystems erreicht wird. Ist die Migration Ziel der Bemühungen, müssten diese intensiviert werden.

#### 4.3.4. Ein fiktives Szenario

Im zweiten Szenario wird, aufbauend auf dem Migrationsszenario, zusätzlich eine Ausrüstungsvorschrift erlassen, die ab dem Zeitschritt neun die Verwendung von ETCS L1 auch in der Netzkategorie „1“ vorschreibt.

Übertragen auf die Realität, könnte diese Vorschrift auf zwei Ebenen zustande kommen. Zum einen kann ein internationaler Akteur die Vorschrift, wie zum Beispiel im europäischen HGV-Netz geschehen, erlassen. Dabei ist jedoch festzuhalten, dass der Beschluss und das Inkrafttreten einer derartigen Vorschrift, die letztlich eine ETCS-Vollausrüstung aller nationalen Netze bedeuten würde, auf europäischer Ebene unrealistisch ist und wahrscheinlich am Widerstand der nationalen Akteure scheitern würde.

Eine derartige Vorschrift kann aber auch im Rahmen von Umsetzungsstrategien der jeweiligen nationalen Netzbetreiber zustande kommen. Dass solche nationalen Umsetzungsstrategien europaweit Anwendung finden könnten, deutet sich in der Diskussion um ETCS „Limited Supervision“ an, siehe zum Beispiel die Artikel von Eichenberger [44, S. 9] oder Panten [123].

Wie im Schweizer Bahnsystem exemplarisch aufgezeigt, ist es möglich, in einem ersten Schritt das - abgängige - nationale Klasse-B-System durch eine europäische Variante aus Interoperabilitätskomponenten zu ersetzen und dann auf der gleichen Hardware ETCS LS zu implementieren. Eine derartige Umrüstung würde, wenn auch auf nationaler Ebene, in der Wirkung einer expliziten Vorschrift von ETCS gleich kommen und schließlich interoperablen Verkehr ermöglichen.

Mit der in diesem Szenario ab Zeitschritt neun für die Netzkategorie „1“ angenommenen

Vorschrift von ETCS wird dies antizipiert und weiter davon ausgegangen, dass ab 2012 in der Spezifikation der SRS 3.0.0 ETCS LS vollständig spezifiziert ist und von allen Netzbetreibern für ihre Netze genutzt wird.

Ziel dieses Szenarios ist es somit, die Wirkung dieser Vorschrift vor dem Hintergrund des eingangs vorgestellten Migrationsszenarios zu bewerten.

Beim Vergleich der Ausrüstungsverläufe der zweiten und dritten Netzkategorie, Seite 187 und 188, mit dem ersten Szenario zeigt sich aber, dass es bis auf eine Abweichung in der dritten Kategorie zu keiner Veränderung in den Ausrüstungen kommt. In der dritten Kategorie werden lediglich knapp 496 Kilometer (ca. 7 % der Kategorie) statt mit dem Systempaket „23“ mit dem Paket „7“ ausgerüstet, was eine Verringerung des Anteils des SysBL1 bedeutet.

Die Zeitpunkte sowie die Mengen der ETCS-Ausrüstungen werden jedoch in keiner der beiden Netzkategorien durch die neu hinzugekommene Vorschrift in der ersten Kategorie tangiert. In beiden Kategorien kommt es, da explizite ETCS-Vorschriften herrschen, wieder zu einer Vollausrüstung, die aber wiederum zu 100 % an eine Doppelausrüstung gekoppelt ist.

In der ersten Netzkategorie bewirkt die neue Vorschrift ab dem Zeitschritt neun eine stete Ausrüstung aller Kilometer mit ETCS L1 (Systempaket „49“), die im Zeitschritt 38, also nach 29 Jahren abgeschlossen ist. Dabei ist diese ETCS-Ausrüstung, wie in den anderen beiden Kategorie auch, an eine Doppelausrüstung mit einem alten Klasse-B-System gebunden.

Auf der Fahrzeugseite sind die Auswirkungen dieser vollständigen Doppelausrüstung der ersten Netzkategorie ebenfalls sehr gering hinsichtlich einer Migration von ETCS. Dies zeigt der Vergleich der Ausrüstungsverläufe des ersten Migrationsszenarios mit dem fiktiven Szenario.

In der ersten Fahrzeugkategorie sinkt, zum Zeitpunkt der größten Verbreitung im Zeitschritt 25, die Menge der mit ETCS ausgerüsteten Fahrzeuge (Systempakete „9“, „13“, „73“ und „77“) von 10347 im ersten Migrationsszenario auf 9208 Fahrzeuge im fiktiven Szenario. Damit schrumpft der Anteil von 42,32 % auf 37,66 %.

Am Ende des Simulationshorizonts im Zeitschritt 40 ist dieses Verhältnis des Unterschiedes zwischen den beiden Szenarien gleich geblieben, wobei beide einen Rückgang des ETCS-Anteils zu verzeichnen haben. Im ersten Migrationsszenario haben die ETCS-Fahrzeuge mit 7559 Stück noch einen Anteil von 30,09 % und im aktuellen, fiktiven Szenario bilden diese Fahrzeuge eine Menge von 6420 Stück mit einem Anteil von 26,25 % am gesamten Fahrzeugbestand.

In der zweiten Fahrzeugkategorie hat sich dagegen der Fahrzeuganteil aller ETCS-Ausrüstungen im Zeitschritt 25 von 8,16 % oder 1714 Fahrzeugen auf 8,74 % oder 1873 Fahrzeugen leicht erhöht. Am Ende des Prognosehorizonts sind im ersten Migrationszenario keine Fahrzeuge mit ETCS mehr vorhanden, wohingegen im aktuellen fiktiven Szenario mit 123 ETCS-ausgerüsteten Fahrzeugen noch ein Anteil von 0,6 % an der Gesamtkategorie besteht, der jedoch eine abnehmende Tendenz besitzt.

Neben diesen sehr geringen Veränderungen muss jedoch hervorgehoben werden, dass der Anteil der Fahrzeuge, die ausschließlich mit ETCS L2 (Systempaket „9“) ausgerüstet sind, sich im Zeitschritt 20 von 193 Fahrzeugen im Migrationsszenario auf 1732 in diesem

Szenario fast verzehnfacht hat.

Dieser sprunghafte Anstieg korrespondiert mit der Tatsache, dass in beiden Fuhrparkkategorien die Kapitalwerte für die Alleinausrüstung mit ETCS L2 und SysBL2 gleich und gegenüber den anderen Systemen am vorteilhaftesten sind. Der Gleichstand der Kapitalwerte resultiert dabei direkt aus der vollständigen Doppelausrüstung des Netzes, in dem sich beide Fahrzeugsysteme uneingeschränkt bewegen können. Diesem Punkt kommt in der abschließenden Bewertung des Szenarios eine herausragende Bedeutung zu.

Zum einen ist für diese Bewertung festzuhalten, dass bis auf die erzwungene Ausrüstung mit ETCS in der ersten Netzkategorie keine signifikanten Veränderungen in der Migration von ETCS auf der Netz- und der Fahrzeugseite auftreten und entgegen den Erwartungen in der ersten Fahrzeugkategorie sogar ein Rückgang der ETCS-Ausrüstungen zu verzeichnen ist.

Zum anderen verdeutlicht dieses Szenario den Effekt von Doppelausrüstungen der Netzseite auf die Fahrzeugseite. So kann in einer Doppelausrüstung eines Netzes das „neue“ System im Vergleich zu bestehenden Systemen für den Fuhrpark nur gleich vorteilhaft, jedoch nicht vorteilhafter erscheinen. Damit baut sich auch kein Druck oder Anreiz für die Fahrzeugseite auf, das „neue“ System zu adoptieren und somit die Migration voranzutreiben.

Um diesen letzten Schritt, der zur relativen Vorteilhaftigkeit des neuen Systems führt und der nötig ist, um eine vollständige Migration zu vollziehen, zu verwirklichen, bedarf es weiterer strategischer Beeinflussungen. Diese könnten zum Beispiel mit dem Rückbau der Doppelausrüstungen, der mit großem zeitlichen Vorlauf angekündigt werden muss, mit der Verteuerung der Trassenpreise bei Benutzung der alten Systeme durch Fahrzeuge oder natürlich mit der Förderung oder der Vorschrift des neuen Systems auch auf der Fahrzeugseite erfolgen.

Vor dem Ziel dieses Szenarios, der Bewertung der Wirkung der Vorschrift einer Systemausrüstung auch im konventionellen Netz auf die Migration von ETCS, muss abschließend festgehalten werden, dass auch in diesem Szenario keine Migration vollzogen wird. Damit zeigt sich eine Vorschrift neuer Systeme, wenn sie lediglich zu einer Doppelausrüstung führt, als weitestgehend wirkungslos hinsichtlich der Durchführung einer vollständigen Migration.

#### **4.3.5. Allgemeine Bewertung**

Dementsprechend ist für eine allgemeine Bewertung dieses Simulationsexperimentes zusammenzufassen, dass die Migration, also die vollständige Ablösung des konventionellen Systems durch ETCS im gesamteuropäischen Eisenbahnsystem, wie es das Modell zeichnet, durch die ergriffenen Interaktionen nicht stattfindet.

Jedoch ist die Übertragung der Ergebnisse dieses Experimentes auf die Realität des europäischen Bahnsystems nur sehr beschränkt möglich. In diesem internationalen Fallbeispiel stößt das Simulationsmodell, das explizit für einen nationalen Rahmen ausgelegt ist, an seine Grenzen.

Dies schlägt sich vor allem sehr gravierend in der Darstellbarkeit der Systemvielfalt nieder. Im Modell sind auf der Netzseite sieben und auf der Fahrzeugseite neun Systeme

abbildbar, wohingegen in Europa eine Vielfalt von über 20 Systemen je Seite besteht.

In der Wirkung für ein Simulationsszenario verschiebt sich damit der grundsätzliche Fokus der Migration von ETCS. In der Realität wird ETCS als eine Antwort auf die bestehende Systemvielfalt entwickelt und umgesetzt. Im Simulationsmodell hingegen vollzieht sich diese Migration von ETCS gegen ein monolithisches System, das vollständig interoperabel in ganz Europa angewendet wird. Es entspricht somit eher einer Ablösung von ETCS in einer fernen Zukunft durch ein zukünftiges System.

Damit ist eine Übertragung der konkreten Ergebnisse dieses Experimentes auf die Realität NICHT möglich.

Jedoch können sowohl auf der Modellebene als auch auf der Ebene des realen Migrationsgeschehens einige Erkenntnisse aus diesem Experiment gewonnen werden.

Für das Simulationsmodell kann festgehalten werden, dass auch sehr große Szenarien simuliert werden können, so dass die größten nationalen Bahnsysteme in Europa ohne Weiteres darstellbar sind. Außerdem hat das Modell in diesem Fallbeispiel wiederum neben der prinzipiellen Kritik plausibles Systemverhalten gezeigt und seine Anwendbarkeit demonstriert.

Für die Ebene des realen Migrationsgeschehens kann aus diesem Fallbeispiel abgeleitet werden, dass die strategischen Beeinflussungen, im besten Fall konzertiert, auf beiden Seiten ansetzen müssen, wenn eine schnelle Migration angestrebt wird.

Gerade im Bezug auf die Doppelausrüstung der Netzseite ist hervorzuheben, dass diese den Druck aber auch die Anreize für die Fahrzeugseite, an der Migration zu partizipieren, stark mindert. Um dem zu begegnen, sollte eine Doppelausrüstung von vornherein als temporärer Bestandsschutz für die Fahrzeugseite somit als Übergangslösung propagiert werden.

Außerdem hat sich gezeigt, dass auch die Ausrüstung des konventionellen Netzes mit ETCS bzw. interoperabler Technik als großer Hebel für eine Migration anzustreben ist. Unter den jetzigen Gegebenheiten bietet jedoch lediglich ETCS „Limited Supervision“ hierfür das technische und politische Potential.

Damit kann für dieses Simulationsexperiment zusammengefasst werden, dass das Modell in einem internationalen Rahmen wie der Europäischen Union an seine Grenzen stößt und die gewonnenen Ergebnisse nur bedingt auf die Realität übertragen werden können. Trotzdem lassen sich prinzipielle Erkenntnisse in Bezug auf die Migration von Zugbeeinflussungssystemen generieren und das gesamte Simulationsexperiment als erfolgreicher Baustein der „angewandten Validierung“ sehen.

## 5. Resümee und Ausblick

Grundlegendes Ziel der Arbeit war es, Aussagen über den Produktlebenszyklus von Zugbeeinflussungssystemen allgemein und des „European Train Control Systems“ im Speziellen zu gewinnen. Abgeleitet aus diesem Ziel stand die Generierung von Prognoseaussagen sowie hierfür die Entwicklung eines Prognosemodells im Zentrum der Arbeit.

Dazu wurde, dem Konzept des Produktlebenszyklus folgend, in der Adoptionstheorie aus mikroanalytischer Sichtweise das theoretische Fundament für die Modellierung gelegt. Im Weiteren wurde das Bild eines Adoptionsprozesses in einen Ausrüstungs- und schließlich einen Investitionsprozess überführt. Für die Operationalisierung der Entscheidung in diesem Investitionsprozess wurde im Rahmen der Investitionsrechnung die Kapitalwertmethode gewählt, die schließlich den Kern der gesamten Modellierung bildet.

Parallel dazu wurde, ausgehend vom Begriff der Verkehrsdienstleistung, ein Modellbild des Systems Eisenbahn entworfen, das in seiner dreigliedrigen Form als Potentialdreieck die generische Darstellung von konkreten Eisenbahnsystemen für die Untersuchung ermöglicht. Dabei wurde dieses Potentialdreieck zum einen durch eine Kategorisierung weiter differenziert und zum anderen durch einen zweigeteilten Systembegriff für Zugbeeinflussungssysteme, inklusive der Dimensionen Komplementarität und technischer Kompatibilität in Form von Zugangsvoraussetzungen, ergänzt.

Dabei ist dieser Aspekt des zweigeteilten Systembegriffs hervorzuheben. Die zugehörige Komplementarität, die einen zentralen Punkt des Eisenbahnsystems allgemein darstellt, konnte unter dem Bild bedingter Netzeffekte auf die Zugbeeinflussungssysteme übertragen werden, womit es möglich wurde, beide Seiten des Systemverbundes, Fuhrpark und Netz, getrennt zu betrachten und dennoch die vorherrschende Interdependenz einzubeziehen.

Im letzten Schritt der Modellierung wurden die theoretischen Grundlagen und das entwickelte Modellbild im Kapitalwert zusammengeführt und in einem Simulationsmodell verdichtet.

Mittels dieses Simulationsmodells konnten abschließend, wie die konkreten Fallbeispiele gezeigt haben, verschiedene Szenarien untersucht und begründete Prognosen zu Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen generiert werden, so wie es das grundlegende Ziel der Arbeit war. Die Ergebnisse dieser Fallbeispiele haben außerdem gezeigt, dass die theoretischen Annahmen ebenso wie die konkrete Umsetzung im Simulationsmodell zu plausiblen Aussagen für reale Migrationsszenarien und auch für rein fiktive Simulationsszenarien führen.



---

## Bewertung

Diese plausiblen Ergebnisse sind für die Bewertung des erarbeiteten Modells festzuhalten, da sie zeigen, dass sich in der Modellierung die theoretischen Grundlagen, das Produktlebenszykluskonzept, die Adoptionstheorie, die Netzeffekttheorie sowie die Investitionstheorie, ebenso bewährt haben wie die Methodik der Simulation zur Generierung der eigentlichen Prognosen.

Parallel dazu hat sich auch die entwickelte Abbildung eines Bahnsystems durch das dreigliedrige Potentialdreieck für die Modellierung im Sinne der Arbeit als erfolgreich erwiesen.

In der Umsetzung des theoretischen Modells in ein lauffähiges (Computer-)Simulationsmodell haben die drei Fallbeispiele außerdem gezeigt, dass mit der Auswahl des Simulators sowie der konkreten Realisierung in einem dreiteiligen System ebenfalls ein gangbarer Weg beschritten wurde.

Letztlich haben die Fallbeispiele auch demonstriert, dass sowohl das Ziel der Generierung von Aussagen zu Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen als auch das abgeleitete, aber zentrale Ziel der Arbeit, die Erarbeitung eines Prognosemodells, als erreicht gewertet werden können.

## Weiterführende Untersuchungen

Weiterführender Forschungsbedarf stellt sich in zwei prinzipiellen Richtungen, zum Ersten in der Weiterentwicklung des Prognosemodells sowie zum Zweiten in der Anwendung des Modells für weitere Untersuchungen.

Auf den theoretischen Grundlagen aufbauend, kann die Weiterentwicklung des Modells entlang der drei primären Konkretisierungen, der ausgewählten Investitionsrechnungsmethode, des entworfenen Modellbildes als Potentialdreieck sowie der Realisierung des theoretischen Modells als Computermodell, erfolgen.

Mit dem Fokus auf die verwendete Investitionsrechnungsmethode kann es Ziel sein, die zentralen Annahmen dieser Methode, den vollkommenen, unbeschränkten Kapitalmarkt und die flache Zinsstrukturkurve, die gleiche Nutzungsdauer der Investitionsalternativen oder die Beschränkung des Zielraums auf eine singuläre, monetäre Größe, aufzuheben.

Hinsichtlich des Modellbildes des Potentialdreiecks kann es Ziel weiterer Entwicklungen sein, die internationale Komponente in den Differenzierungen und Kategorisierungen stärker zu betonen und damit entweder den nationalen auf einen internationalen Rahmen auszudehnen oder den internationalen Einfluss im nationalen Rahmen stärker einzubeziehen.

Für die Weiterentwicklung des konkreten Computermodells bieten sich als Ansatzpunkte die Handhabbarkeit und die Leistungsparameter an. Bei der Handhabbarkeit sollte die Aufbereitung und Integration der Daten in einem Simulationsszenario im Vordergrund stehen, wohingegen die Leistungsparameter insbesondere bezüglich der Dauer der Simulationsläufe und der Menge der anfallenden Ergebnisdaten optimiert werden können.

Eine herausragende Aufgabe fortsetzender Forschungsarbeit liegt jedoch in der weiter-

---

führenden Anwendung des Prognosemodells. Hier kann es zum Beispiel ein grundsätzliches Ziel sein, das gesamte europäische Eisenbahnsystem durch die Verknüpfung der relevanten, nationalen Systeme zu abstrahieren, zu untersuchen und darzustellen.

Auch kann ein weiterführendes Untersuchungsziel darin liegen, Migrationsszenarien konkreter Eisenbahnsysteme darauf zu untersuchen, welche Instrumentarien der strategischen Beeinflussung zu einer effizienten Migration bzw. zu einem Erreichen einer Kritischen Masse führen.

## Resümee

Zusammenfassend ist als Fazit hervorzuheben, dass es mit dem in dieser Arbeit geschaffenen Modell gelungen ist, ein Simulationsmodell zu konzipieren und zu implementieren, das neben begründeten Entwicklungsprognosen für Produktlebenszyklen auch Wirkungsprognosen zu einer Vielzahl von strategischen Interaktionen und Beeinflussungen zulässt.

Damit wird es möglich, zum einen bestehende Entwicklungen abzubilden und in die Zukunft zu projizieren als auch zum anderen die Effekte verschiedenster strategischer Interaktionsmöglichkeiten auf die Entwicklungen der Produktlebenszyklen von Zugbeeinflussungssystemen zu untersuchen und zu diskutieren.

Letztlich ist es gelungen, die Betrachtung der Migration von Zugbeeinflussungssystemen in einem reaktiven, zweiseitigen Ansatz zu entwickeln, der sowohl die Interdependenz der beiden Seiten, des Fuhrparks und des Netzes, als auch deren grundlegende Autonomie in der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Mit der Realisierung eines lauffähigen Simulationsmodells ist es anschließend möglich geworden, diesen Ansatz weiterführenden Untersuchungen und Diskussionen zugänglich zu machen und schließlich Prognosen wirtschaftlicher Produktlebenszyklen für Zugbeeinflussungssysteme, insbesondere ETCS zu erarbeiten.

# Literaturverzeichnis

- [1] ABERLE, Gerd: *Transportwirtschaft. Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen*. 4. Aufl. München : Oldenbourg Verl., 2003
- [2] ACHILLES, Albrecht: Die Migration von ETCS aus dem Blickwinkel des Produktlebenszyklus. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 57 (2008), Nr. 10, S. 666–670
- [3] *Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)*. i.d.F.v. 27.12.1993 (BGBl. I S. 2378). zuletzt geändert durch BGBl. I S. 215 vom 26.02.2008
- [4] ALBERS, Sönke ; GASSMANN, Oliver: *Handbuch Technologie- und Innovationsmanagement. Strategie, Umsetzung, Controlling*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler Verl., 2005
- [5] AMMOSER, Hendrik ; HOPPE, Mirko: *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften*. Dresden : Institut für Wirtschaft und Verkehr, Technische Universität Dresden, 2006
- [6] BANDKE, Britta: Ein neues Zugbeeinflussungssystem für die S-Bahn Berlin (ZBS). In: *Signal + Draht* 93 (2001), Nr. 10, S. 30–34
- [7] BELL, Philipp: *Modeling the diffusion of system-effect technologies*. Diss. Wiesbaden : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2006
- [8] BERNDT, Thomas ; GATHER, Matthias ; SOMMER, Sebastian: Bewertung von Verfahren zur Sicherung von Eisenbahnnebenstrecken. In: *Signal + Draht* 98 (2006), Nr. 3, S. 10–14
- [9] BIETHAHN, Jörg ; HUMMELTENBERG, Wilhelm ; SCHMIDT, Bernd ; STÄHLY, Paul ; ET AL.: *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. State of the Art und neuere Entwicklungen*. Heidelberg : Physica Verl., 1999
- [10] BIETHAHN, Jörg ; LACKNER, Andreas ; RANGE, Michael: *Optimierung und Simulation*. München : Oldenbourg Verl., 2004
- [11] BLUM, Detlef: Obsoleszenz von Elektronik - Eine Bedrohung für die Verfügbarkeit von Schienenfahrzeugen? In: *ZEVrail Glasers Annalen 128 Tagungsband SFT Graz* (2004), S. 144–151
- [12] BOOZ ALLEN HAMILTON: *Privatisierungsvarianten der Deutschen Bahn AG mit und ohne Netz. (PRIMON)*. i.A. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung & Bundesministerium der Finanzen. Berlin, 2006

- [13] BORMET, Jörg: Anforderungen des Betreibers an den Life-cycle in der Fahrwegsi-  
cherungstechnik. In: *Signal + Draht* 99 (2007), Nr. 1+2, S. 6–16
- [14] BRABAND, JENS: Funktionale Sicherheit. In: [65], Kapitel 14, S. 649–699
- [15] BRANDT, Horst: *Investitionspolitik des Industriebetriebs*. 3. Aufl. Wiesbaden :  
Gabler Verl., 1970
- [16] BRAUN, Michael: Nach 75 Jahren Abschied von der Fahrsperr. In: *Signal + Draht*  
94 (2002), Nr. 1+2, S. 42–45
- [17] BUNDESAMT FÜR STATISTIK (SCHWEIZ): *Mobilität und Verkehr*. Internetauftritt  
(Abruf 17.01.2009). [www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11.html](http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11.html),
- [18] BUNDESAMT FÜR VERKEHR BAV, ABTEILUNG INFRASTRUKTUR, SEKTION  
GROSSPROJEKTE: *BAHN 2000 Erste Etappe. Standbericht 2007*. Bern, 2007
- [19] BUNDESAMT FÜR VERKEHR BAV, ABTEILUNG INFRASTRUKTUR, SEKTION  
GROSSPROJEKTE: *European Train Control System ETCS. Standbericht 2007*. Bern,  
2007
- [20] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN (Hrsg.): *Bun-  
desverkehrswegeplan 2003. Grundzüge der gesamtwirtschaftlichen Bewertungsmetho-  
dik*. (Stand 01.02.2002). Berlin, 2002
- [21] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN (Hrsg.): *Bun-  
desverkehrswegeplan 2003. Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik*. (Stand  
01.01.2005). Berlin, 2005
- [22] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG: *Die  
Bahnreform*. Internetauftritt (Abruf 17.01.2009). [www.bmvbs.de/Verkehr/Schiene-  
,2938/Geschichte-der-Bahnreform.htm](http://www.bmvbs.de/Verkehr/Schiene-<br/>,2938/Geschichte-der-Bahnreform.htm),
- [23] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.):  
*Verkehr in Zahlen. 2006/2007*. Bearb. durch: Radke, S., Deutsches Institut für  
Wirtschaftsforschung (DIW). Hamburg, 2006
- [24] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.):  
*Leitfaden Großprojektanträge. Operationales Programm Verkehr EFRE BUND  
2007 - 2013*. Erarb. durch: EFRE-Team, Institut für Strukturpolitik und Wirt-  
schaftsförderung gemeinnützige Gesellschaft mbH (isw Institut). Berlin, 2008
- [25] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE ; DEUTSCHER INDUSTRIE- UND  
HANDELSKAMMERTAG: *Privatisierung der integrierten Deutschen Bahn AG - Aus-  
wirkungen und Alternativen*. BDI-Drucksache Nr. 380. Berlin, 2006
- [26] CAVES, Douglas W. ; CHRISTENSEN, Laurits R. ; TRETHEWAY, Michael W.: Eco-  
nomies of Density Versus Economies of Scale. Why Trunk and Local Service Airline  
Costs Differ. In: *Rand Journal of Economics* 15 (1984), Nr. 4, S. 471–488

- [27] CHOPRA, Sunil ; MEINDL, Peter: *Supply Chain Management. Strategy, Planning and Operation*. 2. Aufl. Upper Saddle River, New Jersey, USA : Prentice Hall, 2001
- [28] CICERO, Marcus T.: *Von der Weissagung*. Bearb. durch: R. Kühner. München : Goldmann Verl., 1962
- [29] CLEMENT, Michel: *Interaktives Fernsehen. Analyse und Prognose seiner Nutzung*. Diss. Kiel : Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2000
- [30] CORSTEN, Hans: *Dienstleistungsmanagement*. 5. Aufl. München : Oldenbourg Verl., 2007
- [31] DB NETZ AG: *Richtlinie 413 - Infrastruktur gestalten. Modul 413.0301 - Streckenstandards*. (Stand 01.01.2002). Frankfurt am Main, 2002
- [32] DB NETZ AG: *Richtlinie 810.0100 - Technischer Netzzugang für Fahrzeuge; Kompatibilität mit den Anforderungen des Netzes - Zugangsvoraussetzungen -*. (Stand 01.07.2004). Frankfurt am Main, 2004
- [33] DB NETZ AG: *Richtlinie 810.0300 - Technischer Netzzugang für Fahrzeuge; Kompatibilität mit den Anforderungen des Netzes - Innovative Techniken auf Fahrzeugen -*. (Stand 19.10.2006). Frankfurt am Main, 2006
- [34] DB NETZ AG: *Trassenpreissystem der DB Netz AG*. Stand Mai 2006. Frankfurt am Main, 2007
- [35] DB NETZ AG: *Schienennetz-Benutzungsbedingungen der DB Netz AG (SNB)*. (Stand 18.02.2008). Frankfurt am Main, 2008
- [36] *Deutsche Bahn Gründungsgesetz (DBGrG)*. i.d.F.v. 27.12.1993 (BGBl. I S. 2378, 2386). zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2407 vom 31.10.2006
- [37] DEUTSCHE BAHN AG: *European Train Control System*. Internetauftritt (Abruf 17.01.2009). [http://www.deutschebahn.com/site/bahn/de/geschaeft/infrastruktur \\_\\_\\_schiene/netz/netzzugang/etcs/etcs \\_\\_\\_allgemeine \\_\\_\\_informationen.html](http://www.deutschebahn.com/site/bahn/de/geschaeft/infrastruktur___schiene/netz/netzzugang/etcs/etcs___allgemeine___informationen.html),
- [38] DEUTSCHE BAHN AG: *Deutsche Bahn Geschäftsbericht 2007*. Berlin, 2008
- [39] DRAZEK, Zygmunt: *Modellierung und Simulation in der Planung und Entscheidungsfindung*. Wismar : Verl. der Hochschule Wismar, 2002
- [40] *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*. i.d.F.v. 08.05.1967 (BGBl. II S. 1563). zuletzt geändert durch BGBl. I S. 467 vom 19.03.2008
- [41] ECKSTEIN, Peter P.: *Repetitorium Statistik. Deskriptive Statistik - Stochastik - induktive Statistik*. 6. Aufl. Wiesbaden : Gabler Verl., 2006
- [42] ECONOMIDES, Nicholas: The Economics of networks. In: *International Journal of Industrial Organization* 14 (1996), Nr. 6, S. 673–699

- [43] *Eisenbahninfrastruktur-Benutzungsverordnung (EIBV)*. i.d.F.v. 03.06.2005 (BGBl. I S. 1566)
- [44] EICHENBERGER, Peter: Kapazitätssteigerung durch ETCS. In: *Signal + Draht* 99 (2007), Nr. 3, S. 6–14
- [45] EISENBAHN-BUNDESAMT: *Allgemeinverfügung PR 3415 Aut vom 25.09.2007. Aus-rüstung von führenden Fahrzeugen mit PZB 90*. Bonn, 2007
- [46] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Entscheidung 2002/731/EG der Kommission vom 30. Mai 2002 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsys-tems Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung des transeuropäischen Hochge-schwindigkeitsbahnsystems gemäß Artikel 6 Absatz 1 der Richtlinie 96/48/EG*. ABl. L 245/37 vom 12.09.2002. zuletzt geändert durch ABl. L 342/1 vom 07.12.2006
- [47] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Entscheidung 2006/679/EG der Kommission vom 28. März 2006 über die Technische Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) zum Teilsystem Zugsteuerung/Zugsicherung und Signalgebung des konventionellen tran-seuropäischen Eisenbahnsystems*. ABl. L 284/1 vom 16.10.2006. zuletzt geändert durch ABl. Nr. L136/11 vom 24.05.2008
- [48] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Entscheidung 2006/860/EG der Kommission vom 7.11.2006 über die Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsys-tems 'Zugsteuerung, Zugsicherung und Signalgebung' des transeuropäischen Hoch-geschwindigkeitsbahnsystems und zur Änderung von Anhang A der Entscheidung 2006/679/EG*. ABl. L 342/1 vom 07.12.2006. zuletzt geändert durch ABl. Nr. L136/11 vom 24.5.2008
- [49] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Statistisches Amt, Eurostat, Verkehr*. Internetauftritt (Abruf 17.01.2009). [www.epp.eurostat.ec.europa.eu](http://www.epp.eurostat.ec.europa.eu),
- [50] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Mitteilung KOM(2003) 442 der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozial-ausschuss und den Ausschuss der Regionen. Transeuropäische Netze Jahresbericht 2001*. KOM(2003) 442. 2003
- [51] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Mitteilung KOM(2005) 298 der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über die Einführung des Europäischen Zugs-i-cherungs-/Zugsteuerungs- und Signalgebungssystems ERTMS/ETCS*. KOM(2005) 298. 2005
- [52] EUROPÄISCHE KOMMISSION (Hrsg.): *Rail Interoperability & Safety. Transposition of legislation and progress on the field*. Bearb. durch: Kema-RTC DHV B.V. 2007
- [53] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *EU energy and transport in figures. Statistical pocket-book 2007/2008*. Brüssel, Belgien, 2008

- [54] EUROPÄISCHER GERICHTSHOF: *Urteil des Gerichtshof vom 22.05.1985. Europäisches Parlament gegen Rat der Europäischen Gemeinschaften. Gemeinsame Verkehrspolitik - Verpflichtung des Rates*. Rechtssache 13/83. Sammlung der Rechtsprechung 1985 Seite 01513
- [55] EUROPÄISCHER RAT: *Richtlinie 91/440/EWG des Rates vom 29.07.1991 zur Entwicklung der Eisenbahnunternehmen der Gemeinschaft*. ABl. L 237/25 vom 24.8.1991. zuletzt geändert durch ABl. Nr. L315/44 vom 03.12.2007
- [56] EUROPÄISCHER RAT: *Richtlinie 96/48/EG des Rates vom 23. Juli 1996 über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems*. ABl. L 235/6 vom 17.09.1996. zuletzt geändert durch ABl. Nr. L141/63 vom 02.06.2007
- [57] EUROPÄISCHER RAT ; EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Entscheidung 1692/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Juli 1996 über gemeinschaftliche Leitlinien für den Aufbau eines transeuropäischen Verkehrsnetzes*. ABl. L 228/1 vom 09.09.1996. zuletzt geändert durch ABl. Nr. L363/1 vom 20.12.2006
- [58] EUROPÄISCHER RAT ; EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Richtlinie 2001/14/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Zuweisung von Fahrwegkapazität der Eisenbahn und die Erhebung von Entgelten für die Nutzung von Eisenbahninfrastruktur*. ABl. L 75/29 vom 15.3.2001. zuletzt geändert durch ABl. Nr. L315/44 vom 03.12.2007
- [59] EUROPÄISCHER RAT ; EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Richtlinie 2004/18/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Koordinierung der Verfahren zur Vergabe öffentlicher Bauaufträge, Lieferaufträge und Dienstleistungsaufträge*. ABl. L 134/114 vom 30.4.2004. zuletzt geändert durch Abl. Nr. L 74/1 vom 15.3.2008
- [60] EUROPÄISCHER RAT ; EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Richtlinie 2001/16/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Interoperabilität des konventionellen Eisenbahnsystems*. ABl. L 110/1 vom 20.4.2001. zuletzt geändert durch ABl. Nr. L141/63 vom 02.06.2007, 2001
- [61] EUROPÄISCHER RAT ; EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Verordnung (EG) Nr. 680/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Grundregeln für die Gewährung von Gemeinschaftszuschüssen für transeuropäische Verkehrs- und Energienetze*. ABl. L 162/1 vom 20.6.2007. 2007
- [62] FALLER, Peter: Logistik und Verkehrsbetriebslehre. In: WEBER, Jürgen (Hrsg.) ; BAUMGARTEN, Helmut (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel Verl., 1999, S. 77–102
- [63] FARRELL, JOSEPH ; SALONER, GARTH: Competition, compatibility and standards - the economics of horses, penguins and lemmings. In: GABEL, H. LANDIS (Hrsg.): *Product standardization and competitive strategy*. Amsterdam : North-Holland Publishing Company, 1987, S. 1–21

- [64] FELDWISCH, Wolfgang ; RUPPERT, Günter: Die S-Bahn Berlin. Ein zukunftsweisendes Stadtschnellbahnsystem. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 51 (2000), Nr. 11, S. 5–12
- [65] FENDRICH, LOTHAR (Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Berlin : Springer-Verl., 2007
- [66] FIELITZ, JOHANNES: *Die Berliner S-Bahn*. Internetauftritt (Abruf 17.01.2009). [www.berliner-s-bahn.ontoo.de](http://www.berliner-s-bahn.ontoo.de),
- [67] FISCHER, Marc: *Produktlebenszyklus und Wettbewerbsdynamik. Grundlagen für die ökonomische Bewertung von Markteintrittsstrategien*. 1. Aufl. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverl., 2001
- [68] FISCHER, Tobias: *Geschäftsmodelle in den Transportketten des europäischen Schienengüterverkehrs. Eine Typologisierung von Eisenbahnverkehrsunternehmen unter besonderer Berücksichtigung der Anbieterstruktur im deutschsprachigen Raum*. Diss. Wien, Österreich : Institut für Transportwirtschaft und Logistik, Wirtschaftsuniversität Wien, 2008
- [69] FRERICH, Walter ; KÜBLER, Knut: *Gesamtwirtschaftliche Prognoseverfahren*. München : Verl. Franz Vahlen, 1980
- [70] GLATZ, Hans: *Der Industriekomplex 'Schienentransportsysteme'. Chancen für eine neue Dynamik in einer 'alten' Industrie*. Wien : Institut für Höhere Studien, 1993
- [71] GÜLDENBERG, Stefan: *Wissensmanagement und Wissenscontrolling in lernenden Organisationen. Ein systemtheoretischer Ansatz*. 4. Aufl. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverl., 2003
- [72] GRAF, Hans G.: *Prognosen und Szenarien in der Wirtschaftspraxis*. München : Carl Hanser Verl., 1999
- [73] GRAUMANN, Mathias: Die Ökonomie von Netzprodukten. In: *ZfB - Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 63 (1993), Nr. 12, S. 1331–1355
- [74] GRISHCHENKO, Yulia: *Eine neue Klasse hybrider Innovationsdiffusionsmodelle. Ein theoretischer Vergleich mit existierenden Ansätzen und eine Analyse mit Simulationen und Realdaten*. Diss. Berlin : Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Humbolt-Universität zu Berlin, 2007
- [75] HARTWIG, Karl-Hans ; TEGNER, Henning ; HANSEN, Frank ; ARMBRECHT, Henrik ; ET AL.: *Verkehrsinfrastruktur-Benchmarking Europa. Verkehrsinfrastrukturausstattung und verkehrspolitische Rahmenbedingungen in ausgewählten europäischen Staaten*. Berlin : BMW AG, 2007
- [76] HECHT, Markus ; JANIK, Marcus ; RIECKENBERG, Thomas ; SALZ, Dorothea: *Diagnose- und Telematikkonzepte für den Schienengüterverkehr*. Berlin : Institut für Straßen und Schienenverkehr, Technische Universität Berlin, 1999



- [77] HEELER, Roger M. ; HUSTAD, Thomas P.: Problems in Predicting New Product Growth for Consumer Durables. In: *Management Science* 26 (1980), Nr. 10, S. 1007–1020
- [78] HEIMERL, Gerhard: *Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs*. München : Intraplan Consult GmbH, 2006
- [79] HENSEL, Michael: *Diffusion von Innovationen. Das Beispiel Voice over IP*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler Verl., 2008
- [80] HERING, Mathias ; KREVET, Rasmus ; LIESCH, Marco: Verfügbarkeit der weltweit ersten ERTMS/ETCS-Linie mit Level 2. In: *Signal + Draht* 95 (2003), Nr. 9, S. 14–18
- [81] HERING, Thomas: *Investitionstheorie*. 3. Aufl. München : Oldenbourg Verl., 2008
- [82] HERZOG, Kati: *Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen. Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden*. Diss. Darmstadt : Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, 2005
- [83] HESS, Hansjörg: *Stand der Umsetzung von ETCS*. Vortrag - Medienanlass Neubausstrecke vom 26. April 2007. Bern : Schweizerischen Bundesbahnen SBB, 2007
- [84] HESS, Thomas: Netzeffekte. Verändern neue Informations- und Kommunikationstechnologien das klassische Marktmodell? In: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium* 29 (2000), Nr. 2, S. 96–98
- [85] HÖFT, Uwe: *Lebenszykluskonzepte. Grundlage für das strategische Marketing- und Technologiemanagement*. Berlin : Erich Schmidt Verl., 1992
- [86] KATZ, Michael L. ; SHARPIO, Carl: Network Externalities, Competition, and Compatibility. In: *The American Economic Review* 1985 (1984), Nr. 3, S. 424–440
- [87] KATZ, Michael L. ; SHARPIO, Carl: System Competition and Network Effects. In: *Journal of Economics Perspectives* 8 (1994), Nr. 2, S. 93–115
- [88] KERSTEN, Frank: *Simulation in der Investitionsplanung*. Wiesbaden : Gabler Verl., 1996
- [89] KOMMISSION, Europäischen: *Vereinbarung zwischen der Europäischen Kommission und den europäischen Eisenbahnverbänden (CER - UIC - UNIFE - EIM) zur Festlegung der wichtigsten Grundsätze für die Einführung des ERTMS*. Brüssel, 2005
- [90] KORNMEIER, Martin: *Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten. Eine Einführung für Wirtschaftswissenschaftler*. Heidelberg : Physica Verl., 2007

- [91] KRUSCHWITZ, Lutz: *Investitionsrechnung*. 11. Aufl. München : Oldenbourg Verl., 2007
- [92] KÖSTER, Dieter: *Was sind Netzprodukte? - Eigenschaften, Definition und Systematisierung von Netzprodukten*. Discussion Paper FS IV 98 - 10. Berlin : Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH, 1998
- [93] LANDER, Sandra: *Strategische Planung von Kreislaufwirtschaftssystemen*. Diss. Berlin : Fakultät III - Prozesswissenschaften, Technische Universität Berlin, 2005
- [94] LEENEN, Maria ; DÖING, Mark ; STRANG, Karl ; WILLE, Nicolas: *Der Weltmarkt für Bahntechnik*. Köln : SCI Verkehr GmbH, 2003
- [95] LEHR, Swen ; NAUMANN, Thomas ; SCHITTENHELM, Otto: Parallele Ausrüstung der Strecke Berlin - Halle/Leipzig mit ETCS und LZB. In: *Signal + Draht* 98 (2006), Nr. 4, S. 6–10
- [96] LICHTBERGER, BERNHARD: Schottergleisverhalten und Einflussparameter - der Versuch eines Überblicks. Teil 3: Die Suche nach der optimalen Instandhaltungsstrategie des Schottergleises. In: VERBAND DEUTSCHER EISENBAHN-INGENIEURE E.V. - VDEI (Hrsg.): *EIK - Eisenbahn Ingenieur Kalender. Jahrbuch für Schienenverkehr und Technik 2002*. Hamburg : Eurailpress, 2002, S. 69–85
- [97] LIENAU, Cay: *Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation*. Diss. Hamburg : Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Universität Hannover, 2006
- [98] LINDE, Frank: *Ökonomie der Information*. Göttingen : Universitätsverl. Göttingen, 2005
- [99] LINDE, Frank: *Marktheoretische und wettbewerbsstrategische Aspekte des Managements von Informationsgütern*. Köln : Institut für Informationswissenschaft, Fachhochschule Köln, 2007
- [100] LORENZ, Erhard ; POHLMANN, Rainer: Das Betriebskonzept für den neuen Berliner S-Bahn-Ring. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 51 (2002), Nr. 6, S. 354–363
- [101] LÜPSCHEN, Benjamin: *Kostendegressionspotentiale in Logistiksystemen. Theoretische Aufarbeitung und Ableitung von Gestaltungsempfehlungen für Transport- und Lagersysteme*. Köln : Seminar für allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Betriebswirtschaftliche Planung und Logistik, Universität Köln, 2004
- [102] LÖWE, Josef: Ersatz der mechanischen Fahrsperrern durch Balisen bei der S-Bahn Berlin. In: *EI - Der Eisenbahningenieur* 52 (2001), Nr. 4, S. 65–68
- [103] MASCHEK, ULRICH: Eisenbahnsicherungstechnik. In: [65], Kapitel 13, S. 599–648

- [104] MEFFERT, Heribert: *Marketing-Prognosemodelle. Quantitative Grundlagen des Marketing*. Stuttgart : Schäffer-Poeschel Verl., 1977
- [105] MEFFERT, Heribert: *Verkehrsdienstleistungsmarketing. Marktorientierte Unternehmensführung bei der Deutschen Bahn AG*. Wiesbaden : Gabler Verl., 2000
- [106] MEISSNER, Jörg-D: *Statistik. verstehen und sinnvoll nutzen*. München : Oldenbourg Verl., 2004
- [107] MENSE, Olaf: European Train Control System - Von der UNISIG-Spezifikation zur Pilotanwendung. In: *Signal + Draht* 1995 (2003), Nr. 1+2, S. 15–18
- [108] MITTMANN, Walter: Infrastrukturzugang für Fahrzeuge. Technische Kompatibilität mit den Anforderungen des Netzes. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 53 (2004), Nr. 9, S. 558–572
- [109] MÜLLER, David: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure*. 1. Aufl. Berlin : Springer-Verl., 2006
- [110] MOSLER, Hans-Joachim ; TOBIAS, Robert: Simulation und Modellierung. In: LANTERMANN, ERNST-DIETER (Hrsg.) ; LINNEWEBER, VOLKER (Hrsg.): *Enzyklopädie der Psychologie: Serie 9 - Umweltpsychologie* Bd. 1: Grundlagen, Paradigmen und Methoden der Umweltpsychologie. Göttingen, 2007, Kapitel 31, S. 1–39
- [111] NIEMEYER, Gerhard: *Kybernetische System- und Modelltheorie. System Dynamics*. München : Franz Vahlen Verl., 1977
- [112] *Norm CENELEC EN 50126. Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)*. 2000-03. Berlin, 1999
- [113] *Norm DIN 31051. Grundlagen der Instandhaltung*. Ref. Nr. DIN 31051:2003-06. Berlin, 2003
- [114] OETTING, Antje: *Physikalische Maßstäbe zur Beurteilung des Leistungsverhaltens von Eisenbahnstrecken*. Diss. Aachen : Fakultät für Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2005
- [115] OLBRICH, Rainer: *Marketing. Eine Einführung in die marktorientierte Unternehmensführung*. 2. Aufl. Berlin : Springer-Verl., 2006
- [116] OSBURG, Jörg: Untersuchung des Leistungsverhaltens beliebiger Signaltechniken. In: *Signal + Draht* 94 (2002), Nr. 1+2, S. 27–30
- [117] PACHL, Jörn: *Glossar der Systemtechnik des Schienenverkehrs*. Internetauftritt (Abruf 17.01.2009). <http://joernpachl.gmxhome.de/glossar.htm>,
- [118] PACHL, Jörn: Zugbeeinflussungssysteme europäischer Bahnen. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 49 (2000), Nr. 11, S. 725–733

- [119] PACHL, Jörn: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. 3. Aufl. Stuttgart : Vieweg+Teubner Verl., 2002
- [120] PACHL, Jörn: Entwicklung der Leit- und Sicherungstechnik für das System Bahn. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 54 (2005), Nr. 3, S. 96–102
- [121] PAGE, Bernd: *Diskrete Simulation. eine Einführung mit Modula-2*. Berlin : Springer-Verl., 1991
- [122] PANTEN, Christian: Mit ETCS soll Eisenbahn-Europa enger zusammenwachsen - kann es das leisten? In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (2007), Nr. 11, S. 670–675
- [123] PANTEN, Christian ; RICHARD, Jan: Beschleunigung der ETCS - Migration durch die Betriebsart 'Limited Supervision'. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (2007), Nr. 11, S. 689–695
- [124] PERRIDON, Louis ; STEINER, Manfred: *Finanzwirtschaft der Unternehmung*. 12. Aufl. München : Verl. Franz Vahlen, 2003
- [125] PFÄHLER, Wilhelm ; WIESE, Harald: *Unternehmensstrategien im Wettbewerb. Eine spieltheoretische Analyse*. 3. Aufl. Berlin : Springer-Verl., 2008
- [126] POGGENSEE, Kay: *Investitionsrechnung. Grundlagen - Aufgaben - Lösungen*. 1. Aufl. Wiesbaden : Gabler Verl., 2009
- [127] PROPST, Georg ; DESCH, Geord W.: *Quantitative Systemwissenschaften, Vorlesungsskript*. Graz : Institut für Mathematik und wissenschaftliches Rechnen, Karl-Franzens-Universität Graz, 2006
- [128] RENPENNING, Frank: Zuverlässigkeitsprognosen in der Eisenbahnsignaltechnik. In: *Signal + Draht* 94 (2002), Nr. 9, S. 18–24
- [129] RÖHRICH, Martina: *Grundlagen der Investitionsrechnung. Eine Darstellung anhand einer Fallstudie*. München : Oldenbourg Verl., 2007
- [130] RIEZLER, Stephan: *Lebenszyklusrechnung. Instrument des Controlling strategischer Projekte*. Wiesbaden : Gabler Verl., 1996
- [131] ROTHE, Ralf ; WELZEL, Christian ; SCHREINERT, Helge: Fortschritte bei der Grunderneuerung der S-Bahn Berlin. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 57 (2008), Nr. 1+2, S. 24–31
- [132] SCHIERENBECK, Henner: *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre*. 16. Aufl. München : Oldenbourg Verl., 2003
- [133] SCHMIDT, Ingo: *Wettbewerbspolitik und Kartellrecht. eine interdisziplinäre Einführung*. 8. Aufl. Stuttgart : Lucius & Lucius Verlagsges., 2005

- [134] SCHODER, Detlef: *Erfolg und Mißerfolg telematischer Innovationen. Erklärung der 'Kritischen Masse' und weiterer Diffusionsphänomene*. Wiesbaden : Deutscher Universitätsverl., 1995
- [135] SCHRÄDER, Andreas: *Netzeffekte in Transport und Tourismus*. Diss. St. Gallen : Universität St. Gallen, 2000
- [136] SCHÜTTE, Jörg ; SCHOLZ, Sven: Alterungscharakteristik und Betriebsqualität in der Leit- und Sicherungstechnik. In: *Signal + Draht* 99 (2007), Nr. 5, S. 7–12
- [137] SCHUBERT, Sebastian: *Wettbewerbsvorteile durch Vereinheitlichung am Beispiel der europäischen Schienenfahrzeugindustrie*. Diss. Halle a.d. Saale : Juristische und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Universität Halle-Wittenberg, 2008
- [138] SCHWANINGER, Markus: *Systemtheorie. Eine Einführung für Führungskräfte, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*. St. Gallen : Institut für Betriebswirtschaft, Universität St. Gallen, 2004
- [139] SCHWARZBAUER, Peter: *Marktforschung und Marktanalyse*. Wien : Institut für Marketing und Innovation, Universität für Bodenkultur Wien, 2005
- [140] SCHWARZER, Christian: *Entwicklung eines modularen Konzeptes für die Instandhaltung schienengebundener Fahrzeuge im öffentlichen Personennahverkehr*. Diss. Berlin : Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, 2006
- [141] SCHWEIZERISCHEN BUNDESBAHNEN SBB: *Statistisches Vademecum. Die SBB in Zahlen 2004*. Bern, 2004
- [142] SCHWEIZERISCHEN BUNDESBAHNEN SBB: *Lebens-Zyklus-Kosten für bahntechnisches Produkte-Management bei der SBB Infrastruktur*. Bern, 2005
- [143] SCHWEIZERISCHEN BUNDESBAHNEN SBB: *Fact-Sheet European Train Control System (ETCS)*. Bern, 2008
- [144] SLOVAK, Roman: *Methodische Modellierung und Analyse von Sicherheitssystemen des Eisenbahnverkehrs*. Diss. Braunschweig : Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2006
- [145] STROHHECKER, Jürgen: *System- und objektorientierte Simulation betriebswirtschaftlicher Entscheidungen*. Berlin : Verl. Duncker & Humblot, 1998
- [146] TEGNER, Henning ; WACHINGER, Loenz ; V., Bundesverband der Deutschen Industrie e. (Hrsg.): *Public Private Partnerships (PPP) für Schieneninfrastruktur. Potenziale, wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit, Gestaltungsoptionen, Umsetzungshemmnisse und Handlungsbedarf*. Berlin, 2007
- [147] THEEG, Gregor ; VINCZE, Bela: Vergleich europäischer Zugbeeinflussungssysteme. In: *Signal + Draht* 99 (2007), Nr. 7+8, S. 6–12

- [148] *Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung (TEIV)*. i.d.F.v. 27.12.1993 (BGBl. I S. 2378). zuletzt geändert durch BGBl. I S. 1092 vom 23.06.2008
- [149] UHL, Holger: *Mehrdimensionale Optimierung der Lifecycle Costs von komplexen (Industrie-)Anlagen und Systemen unter Beachtung von Wissensmanagement-Ansätzen*. Diss. Essen : Fachbereich Maschinenwesen, Universität Duisburg-Essen, 2002
- [150] UIC: *Global Perspectives for ERTMS (ETCS and GSM-R)*. Paris, Frankreich, 2007
- [151] VANGHELUWE, Hans: *Multi-Formalism Modelling and Simulation*. Diss. Ghent, Belgien : Faculteit Wetenschappen, Universiteit Gent, 2000
- [152] VEIDER, Alfred: Die kritische Masse ist überschritten. ETCS ist nicht aufzuhalten. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (2007), Nr. 12, S. 832–833
- [153] VEIT, PETER: Instandhaltung und Anlagenmanagement. In: [65], Kapitel 18, S. 873–925
- [154] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V.: *VDI Richtlinie 3633 Blatt 1. Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Entwurf. Düsseldorf, 2000
- [155] *Vertrag zur Gründung der europäischen Gemeinschaft (EGV)*. i.d.F.v. 24.12.2002 (Abl. C 325/33)
- [156] VINCZE, BÉLA ; TARNAI, GÉZA: *Evolution of Train Control Systems*. Zilina, Slovak Republic : 14th International Symposium EURNEX-ZEL, 2006
- [157] WEIBER, Rolf: *Diffusion von Telekommunikation: Problem der kritischen Masse*. Wiesbaden : Gabler Verl., 1992
- [158] WEIBER, ROLF: Systemgüter und klassische Diffusionstheorie. Elemente einer Diffusionstheorie für Kritische Masse-Systeme. In: STOETZER, MATTHIAS-WOLFGANG (Hrsg.): *Die Diffusion von Innovationen in der Telekommunikation*. Berlin : Springer-Verl., 1995, S. 39–70
- [159] WEIGAND, Werner: ETCS - betriebliche Vorteile der unterschiedlichen Funktionsstufen und Betriebsarten. In: *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau* 56 (2007), Nr. 11, S. 676–681
- [160] WÖHE, Guenter: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 19. Aufl. Berlin : Verl. Franz Vahlen, 1996
- [161] ZEHBOLD, Cornelia: *Lebenszykluskostenrechnung*. Wiesbaden : Gabler Verl., 1996

# Anhang

## Anhangsverzeichnis

A. Interaktive Simulationsoberflächen . . . . .	133
B. Simulationsexperiment - Berliner S-Bahn . . . . .	135
B.1. Systemkompatibilität & Systempakete . . . . .	135
B.2. Eingangsdaten . . . . .	136
B.3. Abbildung des realen Migrationsszenarios . . . . .	139
B.4. Abbildung des fiktiven Szenarios . . . . .	141
C. Simulationsexperiment - Schweizer Eisenbahn . . . . .	145
C.1. Systemkompatibilität & Systempakete . . . . .	145
C.2. Eingangsdaten . . . . .	146
C.3. Abbildung des realen Migrationsszenarios . . . . .	149
C.4. Abbildung des fiktiven Szenarios . . . . .	159
D. Simulationsexperiment - Gesamteuropa . . . . .	170
D.1. Systemkompatibilität & Systempakete . . . . .	170
D.2. Eingangsdaten . . . . .	171
D.3. Europäische ETCS-Projekte . . . . .	172
D.4. Abbildung des realen Migrationsszenarios . . . . .	175
D.5. Abbildung des fiktiven Szenarios . . . . .	182

## A. Interaktive Simulationsoberflächen

1

Null - Szenario

28.10.1980 23:30:00

Ausgangsszenario, bei dem alle Einzelsysteme beinhaltet sind, alle Forderungen und Performancesätze auf '0' stehen, keine KM oder FZG vorhanden sind, etc.

Szenario betrachten

Szenario manipulieren

deutes Szenario

Szenario kopieren

Szenario löschen

Simulationsmodell schließen

Szenario ID

Szenario Name:

Szenario Datum:

Szenario Beschreibung:

Szenariointeraktion

Level 1 - Übergabe

☒ Ja
☐ Nein

Übergabe der Ausschlüsse von Einzelsystemen der Hierarchstufe 1, der Performance sowie der Levelforderungen.

Level 2 - Übergabe

☒ Ja
☐ Nein

Übergabe der Bestände an Kilometern und Fahrzeugen.

Level 3 - Übergabe

☒ Ja
☐ Nein

Übergabe der Szenarioeinzelwerte, der Parameter der Kategorien, der Befahrungssätze sowie der Transportparameter.

Level 4 - Übergabe

☒ Ja
☐ Nein

Übergabe der Auszahlungs- und Einzahlungskoeffizienten sowie der jeweiligen Fordersätze.

Level 5 - Übergabe

☒ Ja
☐ Nein

Übergabe der strategischen Interaktionen.

Szenario übergeben

Zeithorizont:

100

Bestandsaktualisierung

☒ Ja
☐ Nein

Systemalterung

☒ Ja
☐ Nein

Umgebungsalterung

☒ Ja
☐ Nein

Strategie - Interaktionen

☒ Ja
☐ Nein

Simulation starten!

Start des Simulationsmodells

Soll vor dem Start des Simulationsmodells die Bestände des aktuellen Szenarios übergeben werden? Eventuell nötig, da die Bestände des Simulationsmodells je Modelllauf manipuliert werden.

Soll in dem Simulationslauf die Alterung der Zugsicherungssysteme mit nachvollzogen werden?

Soll in dem Simulationslauf die Alterung der Kilometer- und Fahrzeugbestände nachvollzogen werden?

Sollen die strategischen Interaktionen in die Simulation mit einbezogen werden?



## Szenariomanipulation

Szenario ID:

1

Schließen - Zurück

Szenario Datum/Uhrzeit:

28.10.1980 23:30:00

Szenario Name:

Null - Szenario

Szenario Beschreibung:

Ausgangsszenario, bei dem alle Einzelsysteme beinhaltet sind, alle Forderungen und Performances auf 0 stehen, keine Mf oder FzG vorhanden sind, etc.

Levelforderung	Fuhrpark Einzelsystem Ausschluss H52	Netz Einzelsystem Ausschluss H52	Fuhrpark Strategie I	Fuhrpark Strategie II	Fuhrpark Strategie III	Netz Strategie I	Netz Strategie II	Netz Strategie III	Netz Strategie IV
Anfangsbestände	Einzahlungskoeffizienten	Einzelwerte / Transport	Fuhrpark Kostensätze	Netz Kostensätze	Fuhrpark Fördersätze	Fuhrpark Ausschluss H51	Netz Ausschluss H51	Kategorien	Einzelsystemperformance

### Szenario Einzelwerte

Kalkulationszinsatz: 0

Fahrzeug - System Nutzungsdauer: 0

Netz - System Nutzungsdauer: 0

Fahrzeug - System Over Time: 0

Netz - System Over Time: 0

### Szenario Transport

Transport ID	Transport Kategorie	Entwicklungs- rate Zeit- schritt [%]	Transportmenge [T(KW)]
1	HGV	0	0
2	schnellSPV	0	0
3	standardSPV	0	0
4	langsamSPV	0	0
5	schnellPNV	0	0
6	standardPNV	0	0
7	langsamPNV	0	0
8	schnellGüV	0	0
9	standardGüV	0	0
10	langsamGüV	0	0

### Netz - Transport - Befahrungssätze

Netz-kategorie ID	Transport ID	Erbringungssatz
1	1	1
2	2	1
3	3	1
4	4	1
5	5	1
6	6	1
7	7	1
8	8	1
9	9	1
10	10	1
11	1	0
12	2	0
13	3	0
14	4	0
15	5	0
1	1	2
2	2	2
3	3	2
4	4	2
5	5	2
6	6	2
7	7	2
8	8	2
9	9	2
10	10	2

Datensatz: 1 von 150

## B. Simulationsexperiment - Berliner S-Bahn

### B.1. Systemkompatibilität & Systempakete

Tabelle b.1.: Systemkompatibilität - Fallbeispiel S-Bahn

		Systeme - Netzseite	
		Fahrsperre	ZBS
Systeme - Fahrzeugseite	Fahrsperre	1	0
	ZBS	0	1

Tabelle b.2.: Systempakete der Fahrzeugseite - Fallbeispiel S-Bahn

Systempakete	Einzelnen Systeme	
	Fahrsperre	ZBS
129	✓	
257		✓
385	✓	✓

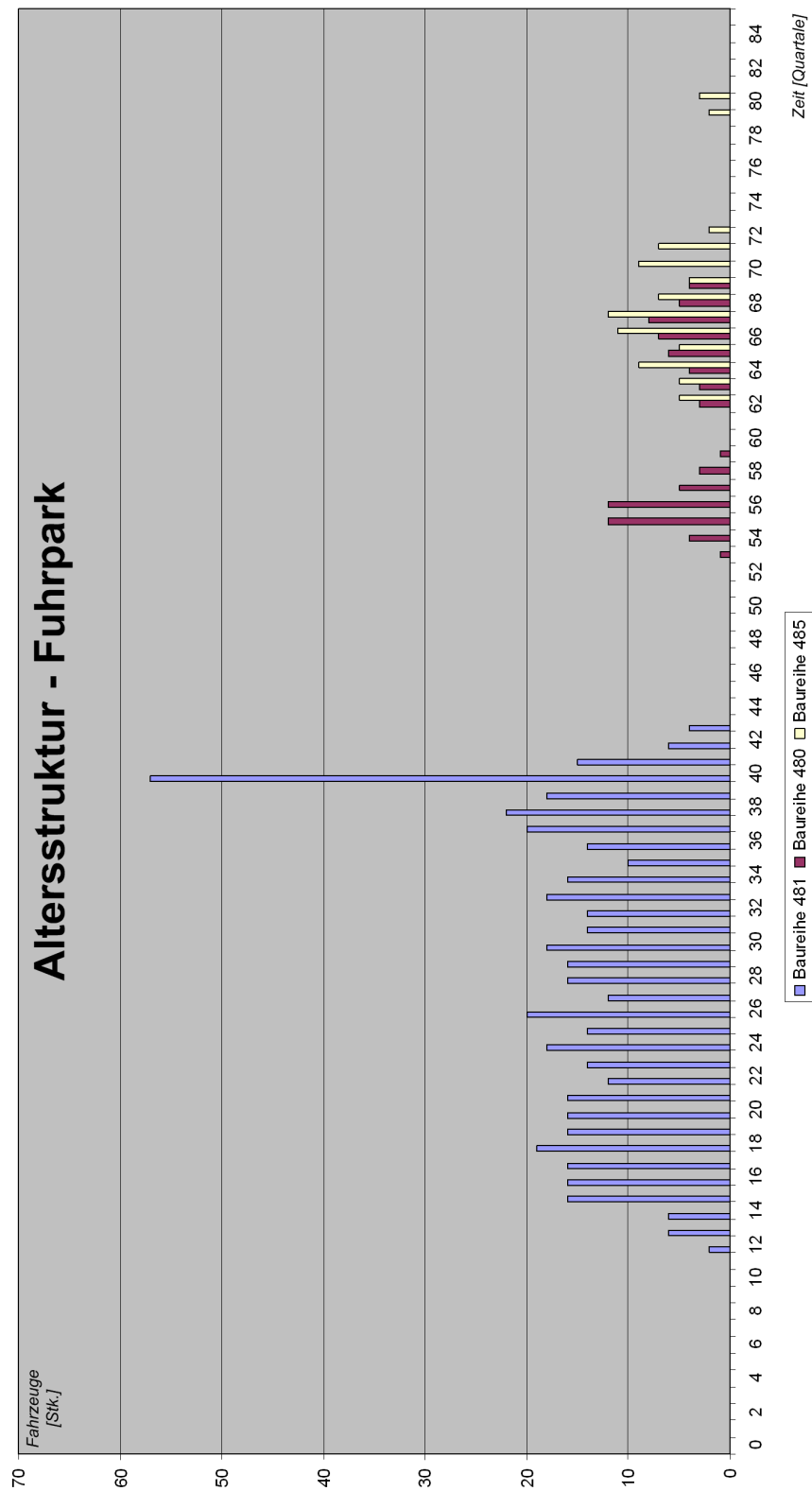
Tabelle b.3.: Systempakete der Netzseite - Fallbeispiel S-Bahn

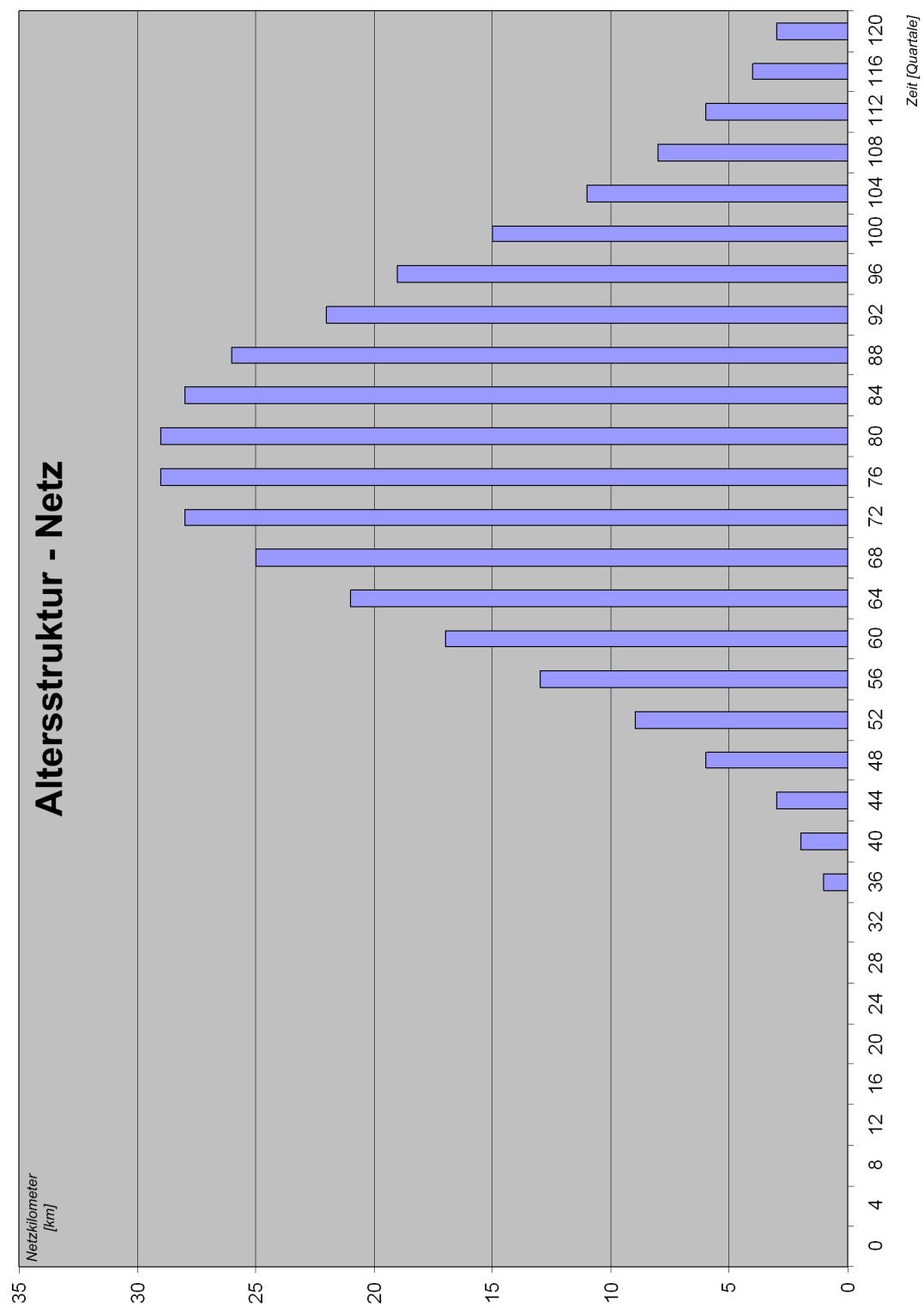
Systempakete	Einzelnen Systeme	
	Fahrsperre	ZBS
33	✓	
65		✓
97	✓	✓

## B.2. Eingangsdaten

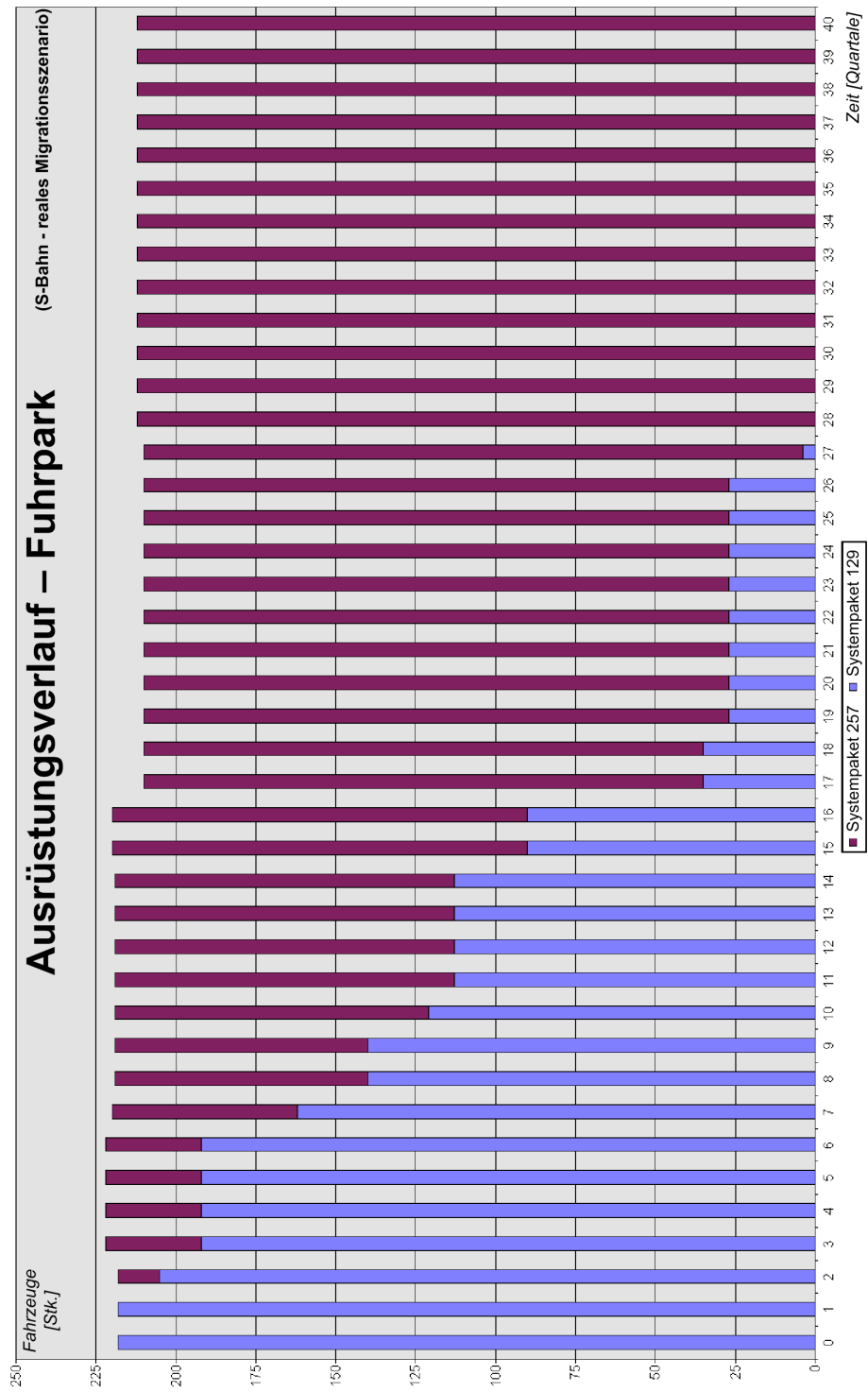
Tabelle b.4.: Eingangsdaten - Fallbeispiel S-Bahn

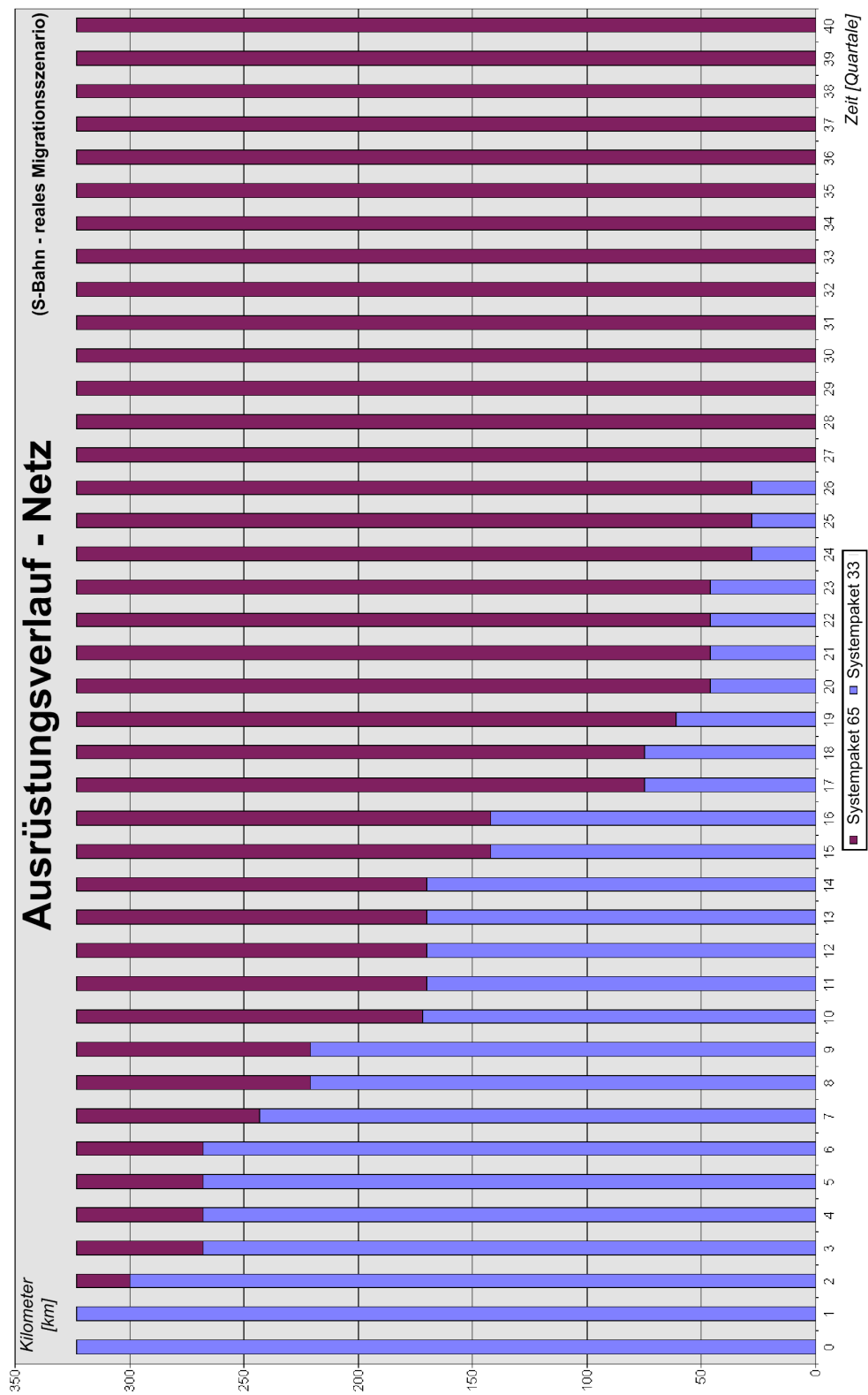
<b>Allgemeine Daten</b>	
Startzeitpunkt ( $t = 0$ )	ca. 2006
Nutzungsdauer	30 Jahre
Kalkulationszinssatz	3,5 Prozent
Fuhrpark	218 Fahrzeuge
Netz	323 Kilometer
Betriebsleistung	3,2087 Mio Trassenkilometer pro Jahr
Einzahlungskoeffizient - Netzseite	0,62 Euro pro Trasse, pro Kilometer
Einzahlungskoeffizient - Fahrzeugseite	1,62 Euro pro Trassenkilometer
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - Fahrsperre (altes System)</b>	
Anschaffungsauszahlung	150.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	12.000 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungssauszahlungen	4.500 Euro pro Fahrzeug
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - ZBS (neues System)</b>	
Anschaffungsauszahlung	330.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	6.600 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungssauszahlungen	6.600 Euro pro Fahrzeug
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - Fahrsperre (altes System)</b>	
Anschaffungsauszahlung	114.750 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	8.000 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungssauszahlungen	3.442 Euro pro Kilometer
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - ZBS (neues System)</b>	
Anschaffungsauszahlung	184.600 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	3.692 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungssauszahlungen	3.692 Euro pro Kilometer



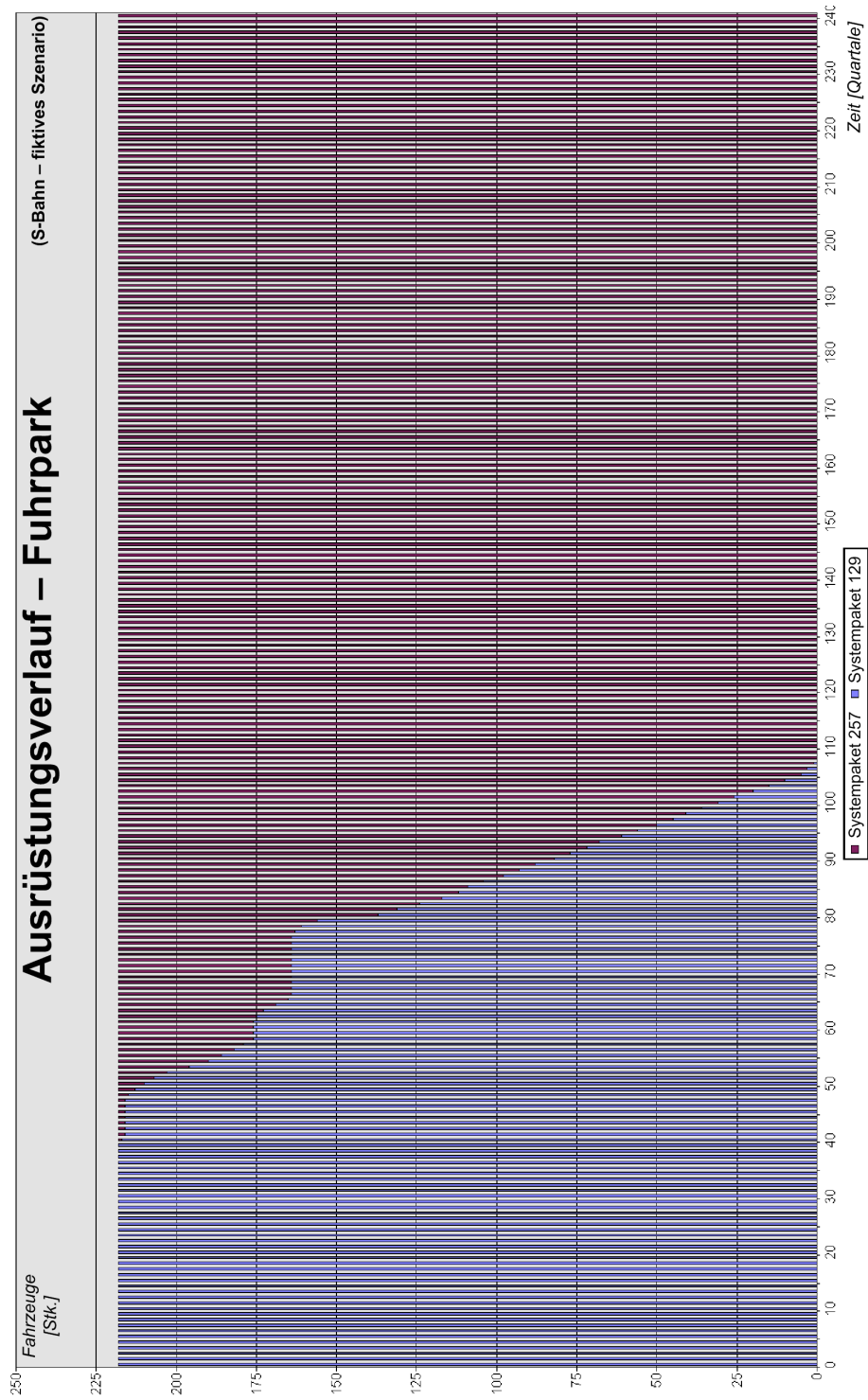


### B.3. Abbildung des realen Migrationsszenarios

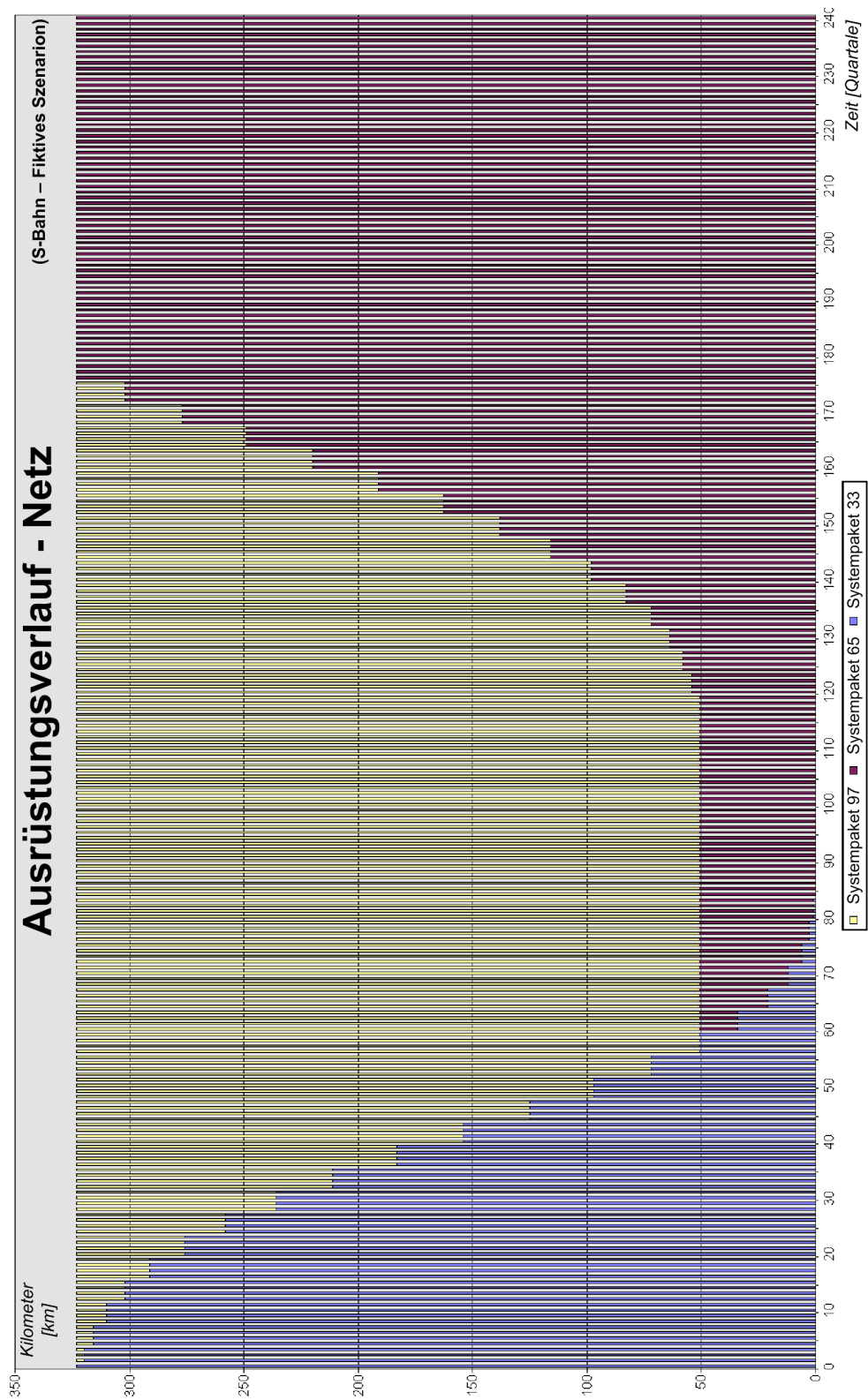


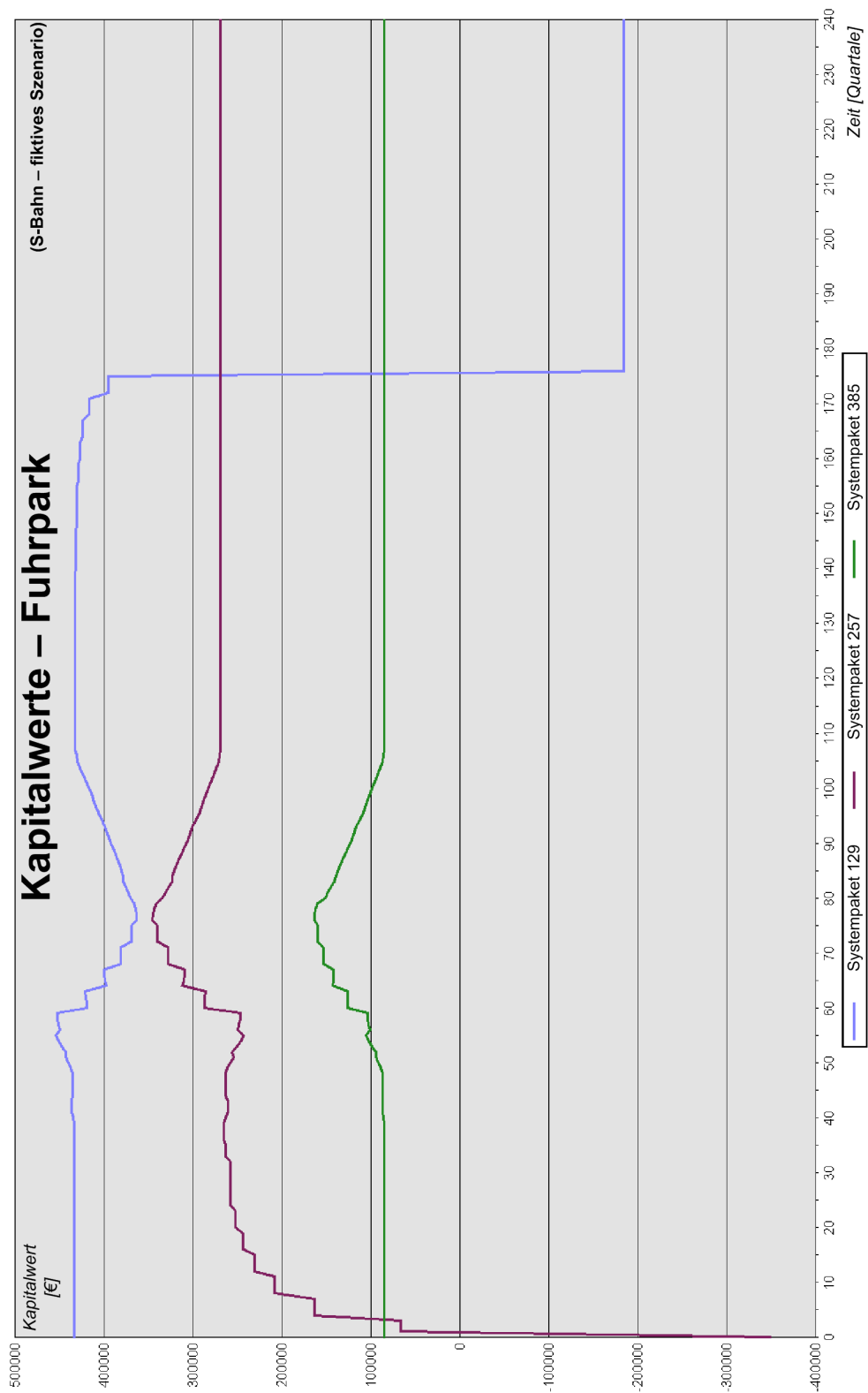


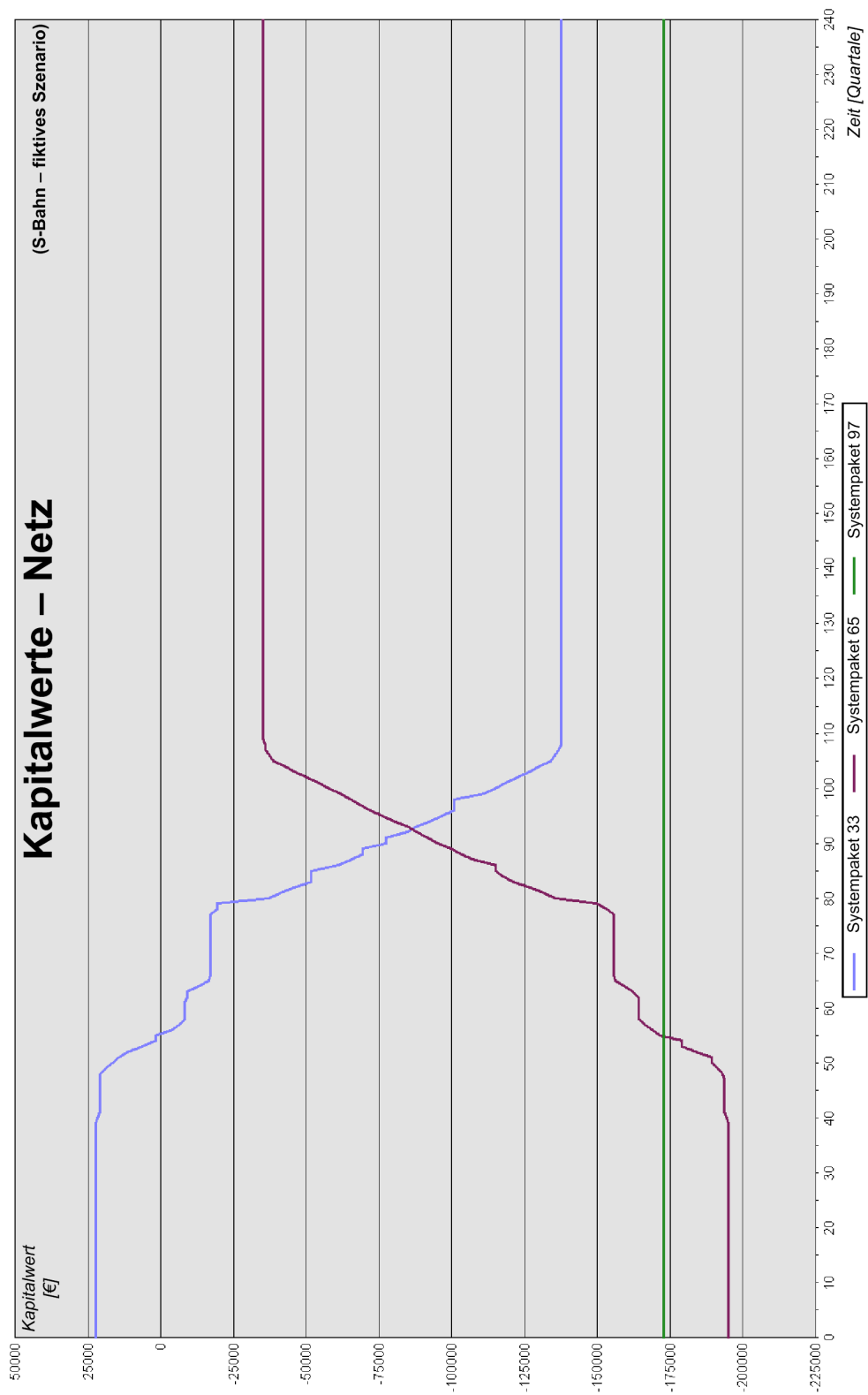
#### B.4. Abbildung des fiktiven Szenarios











## C. Simulationsexperiment - Schweizer Eisenbahn

### C.1. Systemkompatibilität & Systempakete

Tabelle c.1.: Systemkompatibilität - Fallbeispiel Schweiz

		Systeme - Netzseite			
		ETCS LS	SysBL1	EuroSys	ETCS L2
Systeme - Fahrzeugseite	ETCS L1	<b>1</b>	0	0	0
	SysBL1	0	<b>1</b>	0	0
	ETM	0	0	<b>1</b>	0
	ETCS L2	<b>1</b>	0	0	<b>2</b>

Tabelle c.2.: Systempakete der Fahrzeugseite - Fallbeispiel Schweiz

Systempakete	Einzelnen Systeme			
	ETCS L1	SysBL1	ETM	ETCS L2
9				✓
65		✓		
73		✓		✓
81		✓	✓	
89		✓	✓	✓
129	✓			
193	✓	✓		
209	✓	✓	✓	

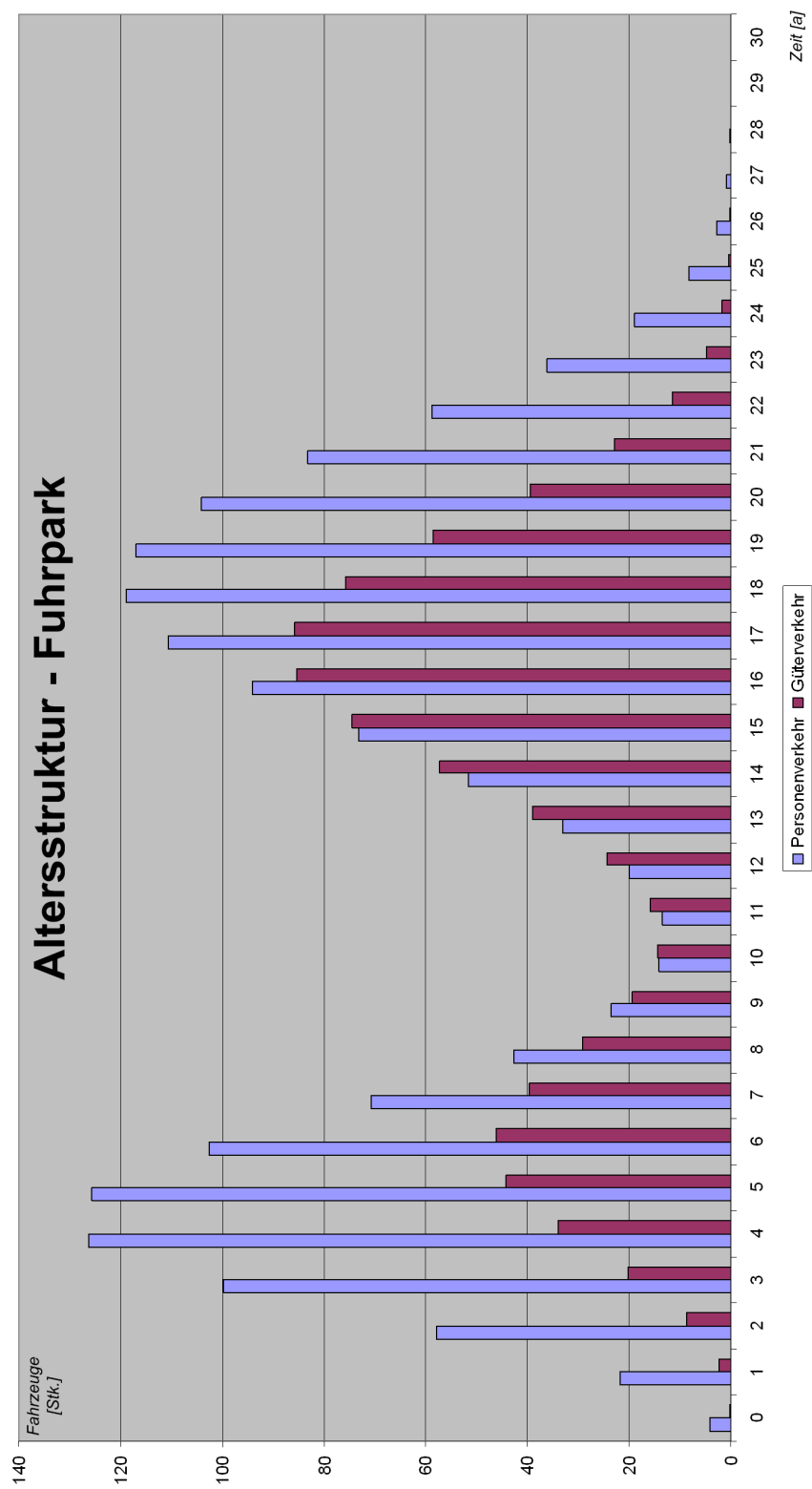
Tabelle c.3.: Systempakete der Netzseite - Fallbeispiel Schweiz

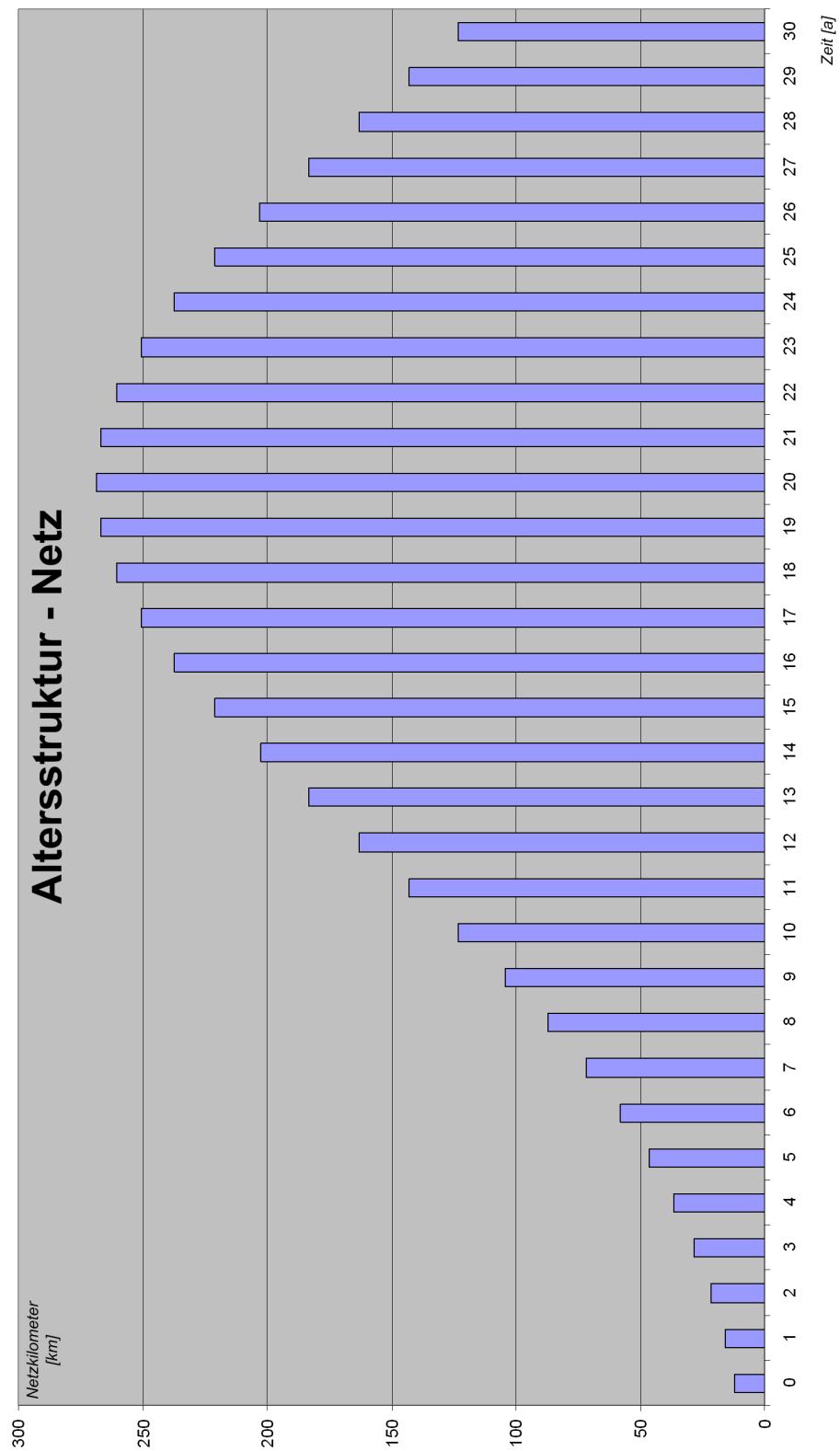
Systempakete	Einzelnen Systeme			
	ETCS LS	SysBL1	EuroSys	ETCS L2
1				
5				✓
9			✓	
13			✓	✓
17		✓		
21		✓		✓
65	✓			
69	✓			✓
73	✓		✓	
77	✓		✓	✓
81	✓	✓		
89	✓	✓		✓

## C.2. Eingangsdaten

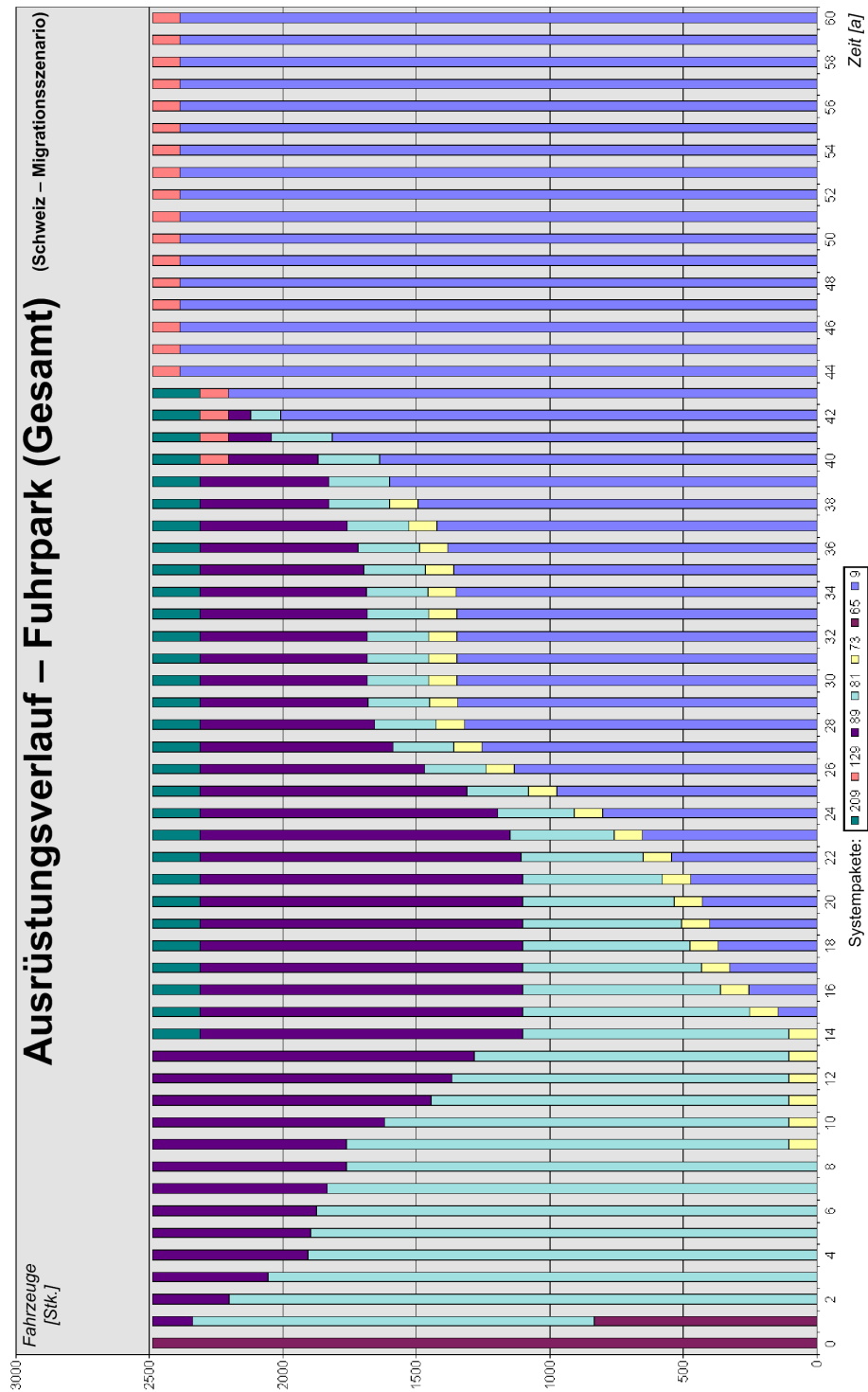
Tabelle c.4.: Eingangsdaten - Fallbeispiel Schweiz

<b>Allgemeine Daten</b>	
Startzeitpunkt ( $t = 0$ )	ca. 2003
Nutzungsdauer	30 Jahre
Kalkulationszinssatz	3,5 Prozent
Fuhrpark - gesamt	2.490 Fahrzeuge
Fuhrpark - Kategorie 1 (Personenverkehr)	1.636 Fahrzeuge
Fuhrpark - Kategorie 2 (Güterverkehr)	854 Fahrzeuge
Netz - gesamt	5.005 Kilometer
Netz - Kategorie 1 (konv. Normalspurnetz)	4.853 Kilometer
Netz - Kategorie 2 (Mattstetten-Rothrist)	45 Kilometer
Netz - Kategorie 3 (Lötschberg-Basisstrecke)	35 Kilometer
Netz - Kategorie 4 (Gotthard-Basisstrecke)	57 Kilometer
Netz - Kategorie 5 (Ceneri-Basisstrecke)	35 Kilometer
Betriebsleistung Personenverkehr	139,9546 Mio Trkm pro Jahr
Betriebsleistung Güterverkehr	30,2361 Mio Trkm pro Jahr
Einzahlungskoeffizient - Netzseite	2,8 Euro pro Trasse, pro Kilometer
Einzahlungskoeffizient - Personenverkehr	2,61 Euro pro Trassenkilometer
Einzahlungskoeffizient - Güterverkehr	10,02 Euro pro Trassenkilometer
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - ETCS L1</b>	
Anschaffungsauszahlung	120.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	2.400 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	2.400 Euro pro Fahrzeug
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - SysBL1</b>	
Anschaffungsauszahlung	80.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	1.600 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.600 Euro pro Fahrzeug
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - ETM</b>	
Anschaffungsauszahlung	25.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	500 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	500 Euro pro Fahrzeug
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - ETCS L2</b>	
Anschaffungsauszahlung	270.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	2.700 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	2.700 Euro pro Fahrzeug
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - ETCS LS</b>	
Anschaffungsauszahlung	75.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	1.125 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.125 Euro pro Kilometer
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - SysBL1</b>	
Anschaffungsauszahlung	60.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	1.200 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.200 Euro pro Kilometer
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - EuroSys</b>	
Anschaffungsauszahlung	75.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	1.125 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.125 Euro pro Kilometer
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - ETCS L2</b>	
Anschaffungsauszahlung	200.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	2.000 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	2.000 Euro pro Kilometer

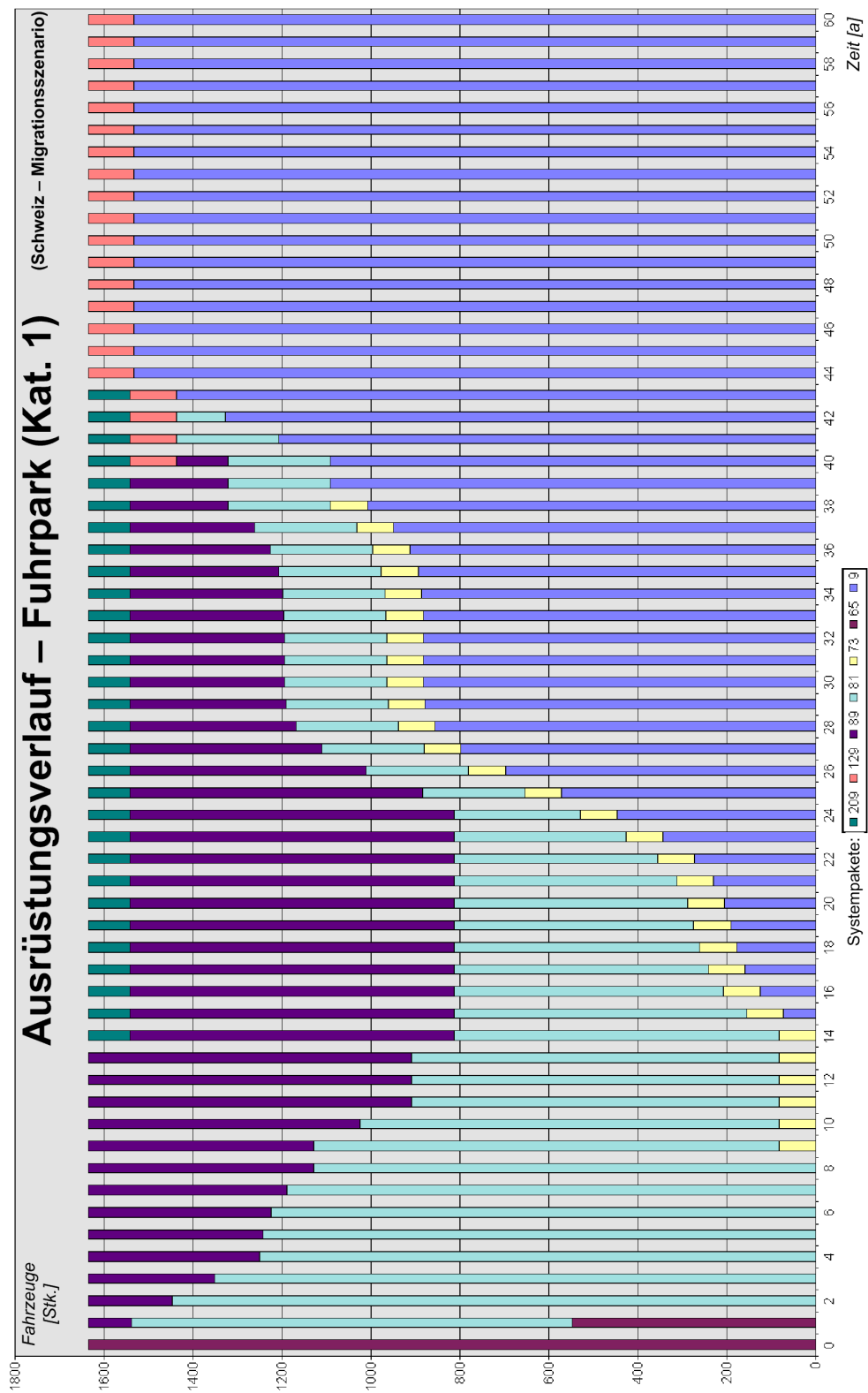


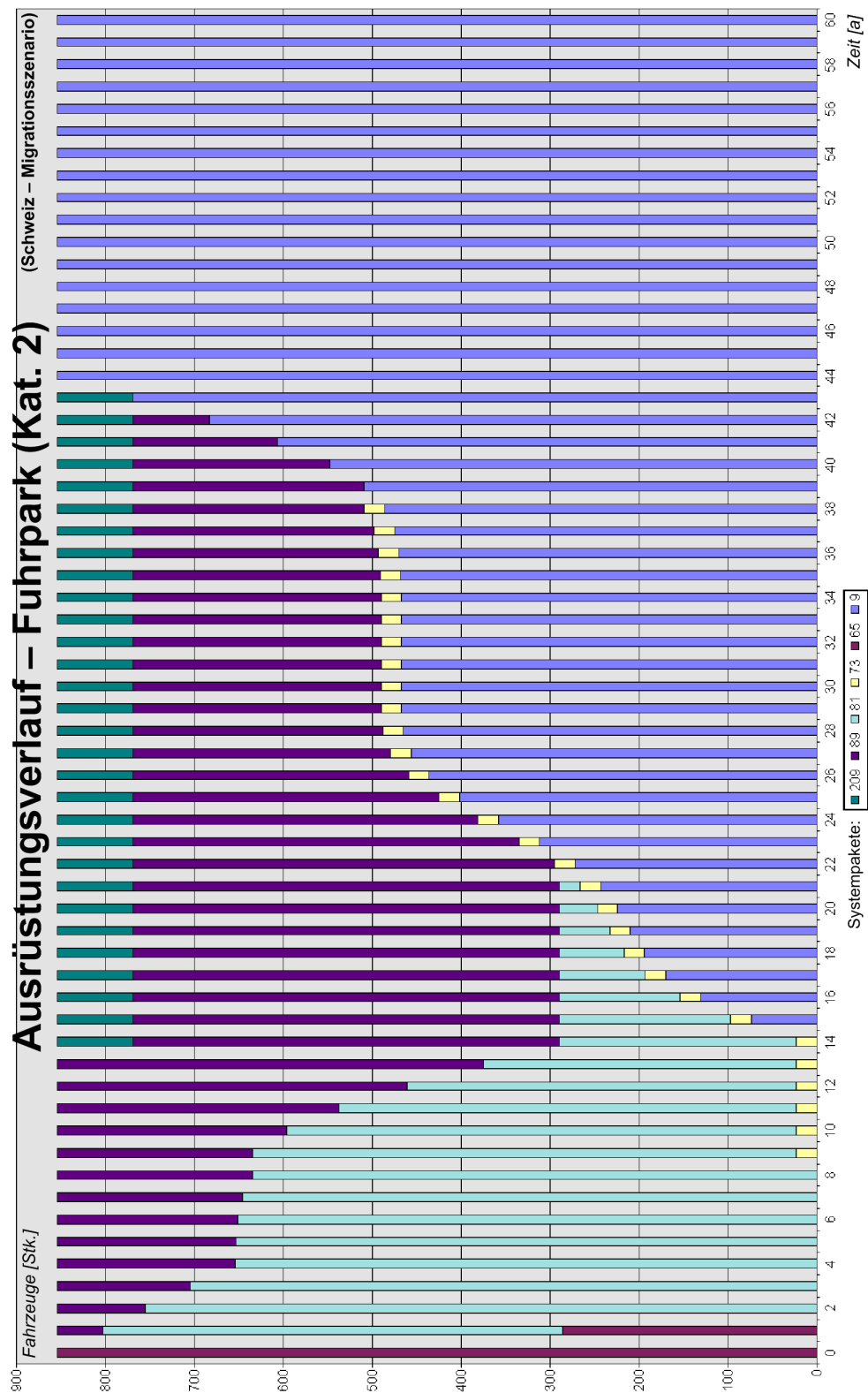


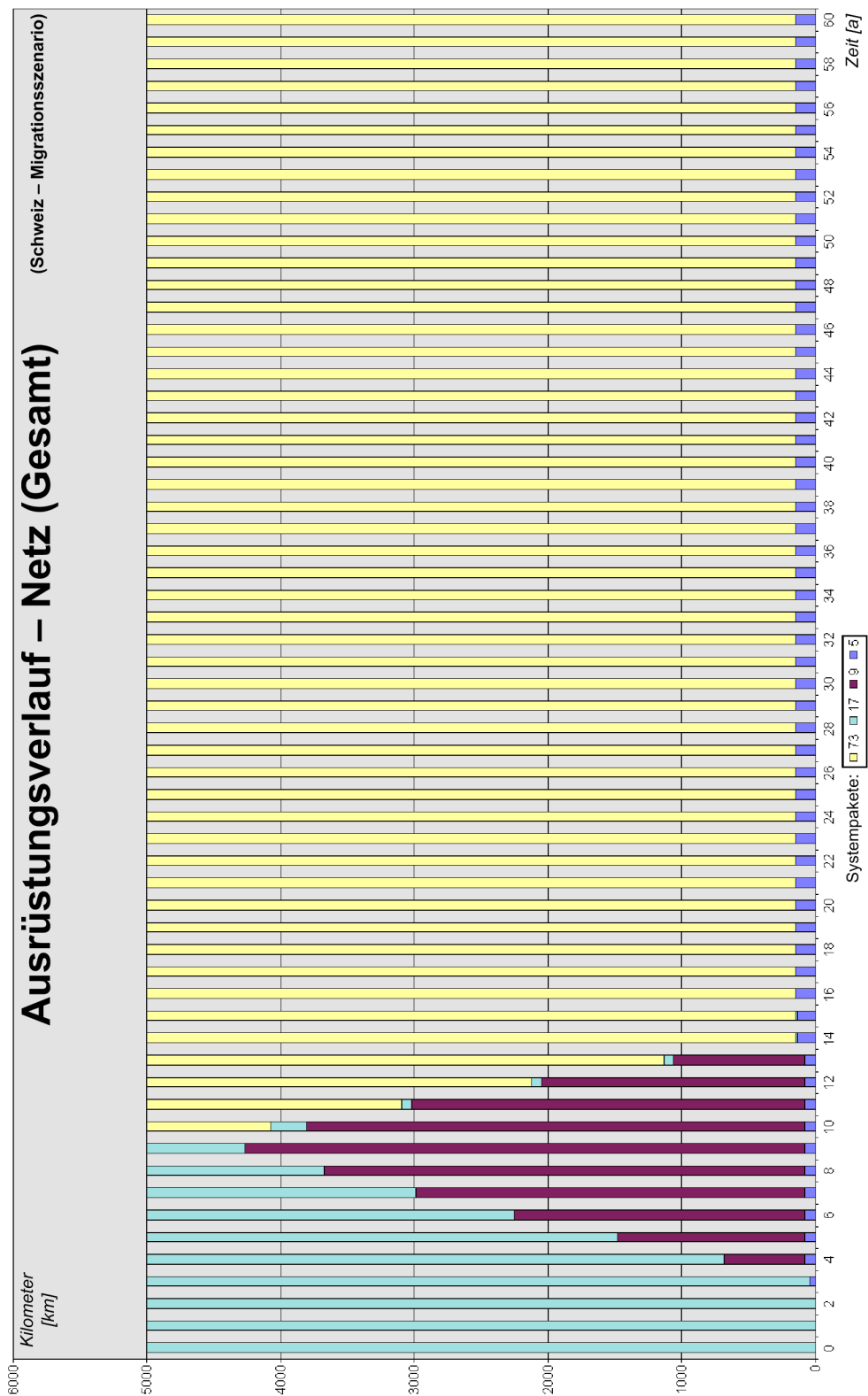
### C.3. Abbildung des realen Migrationsszenarios

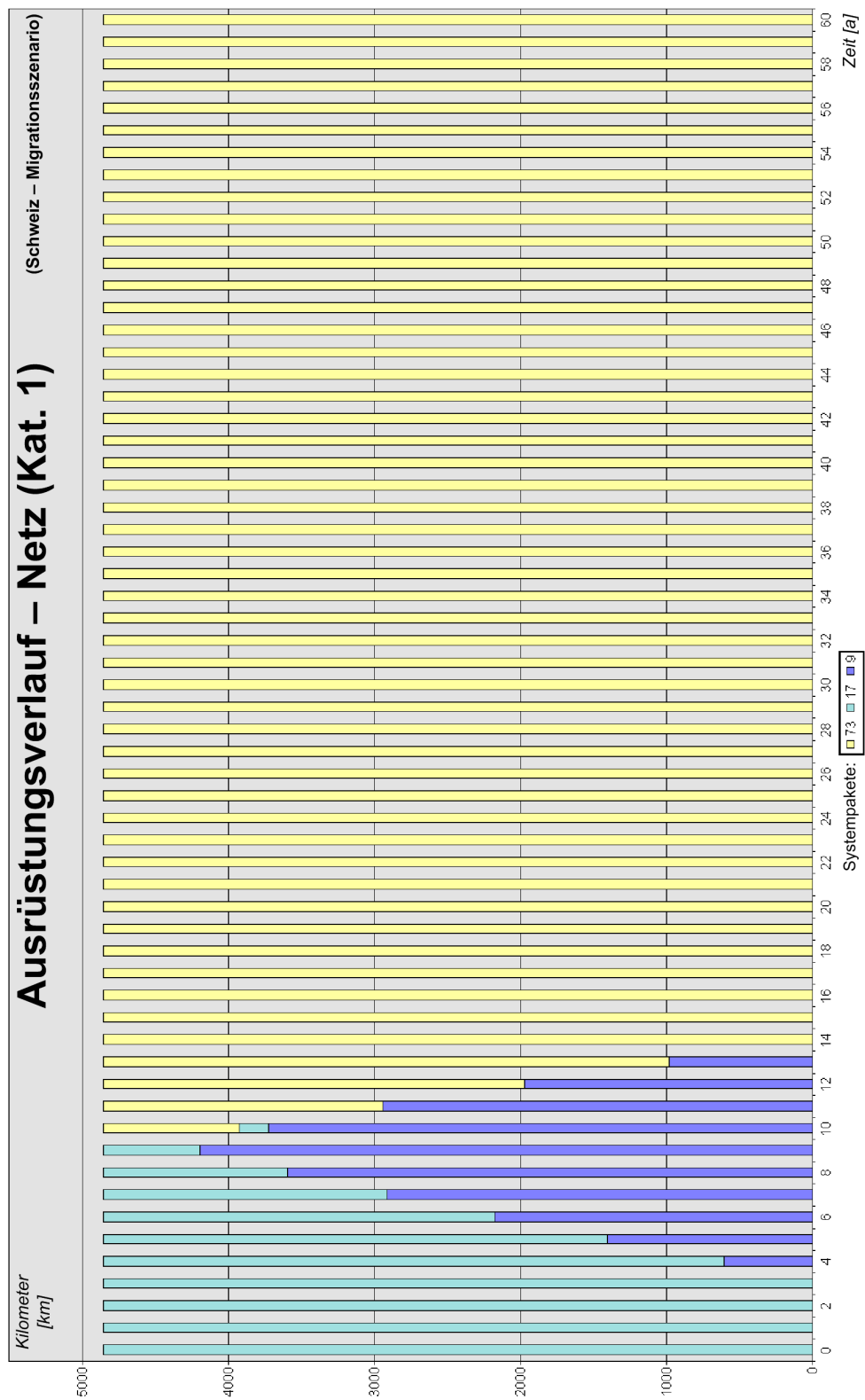


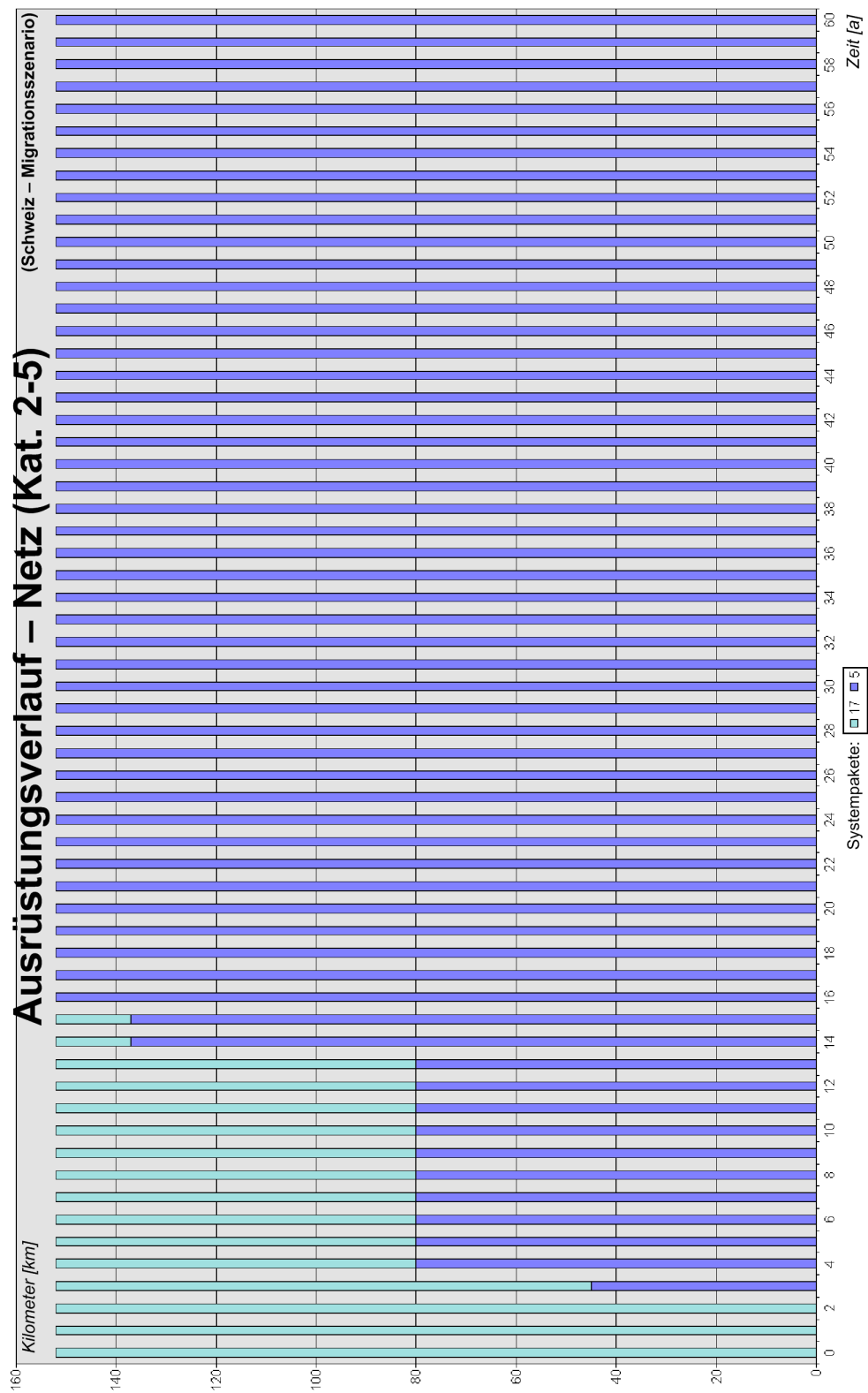


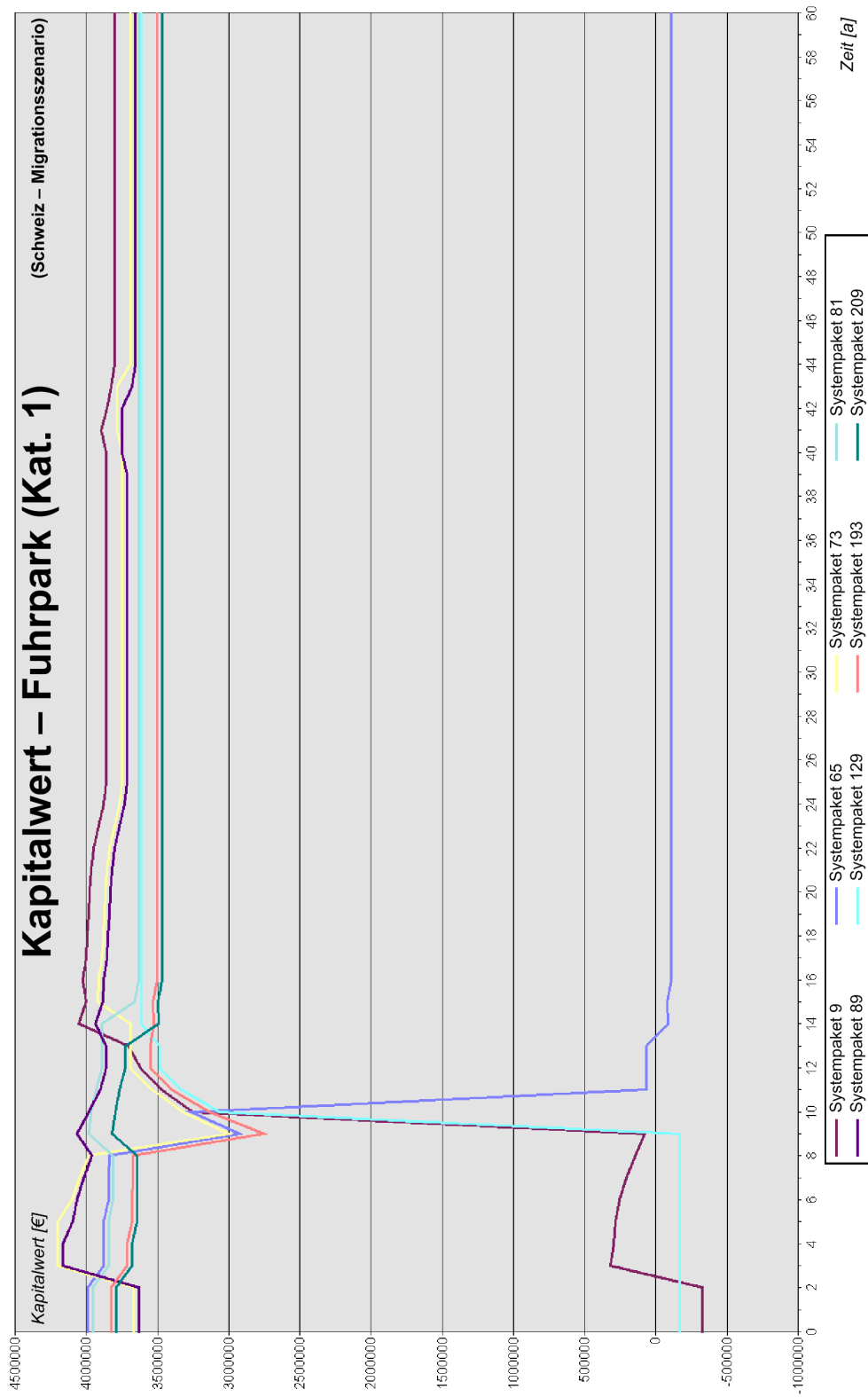


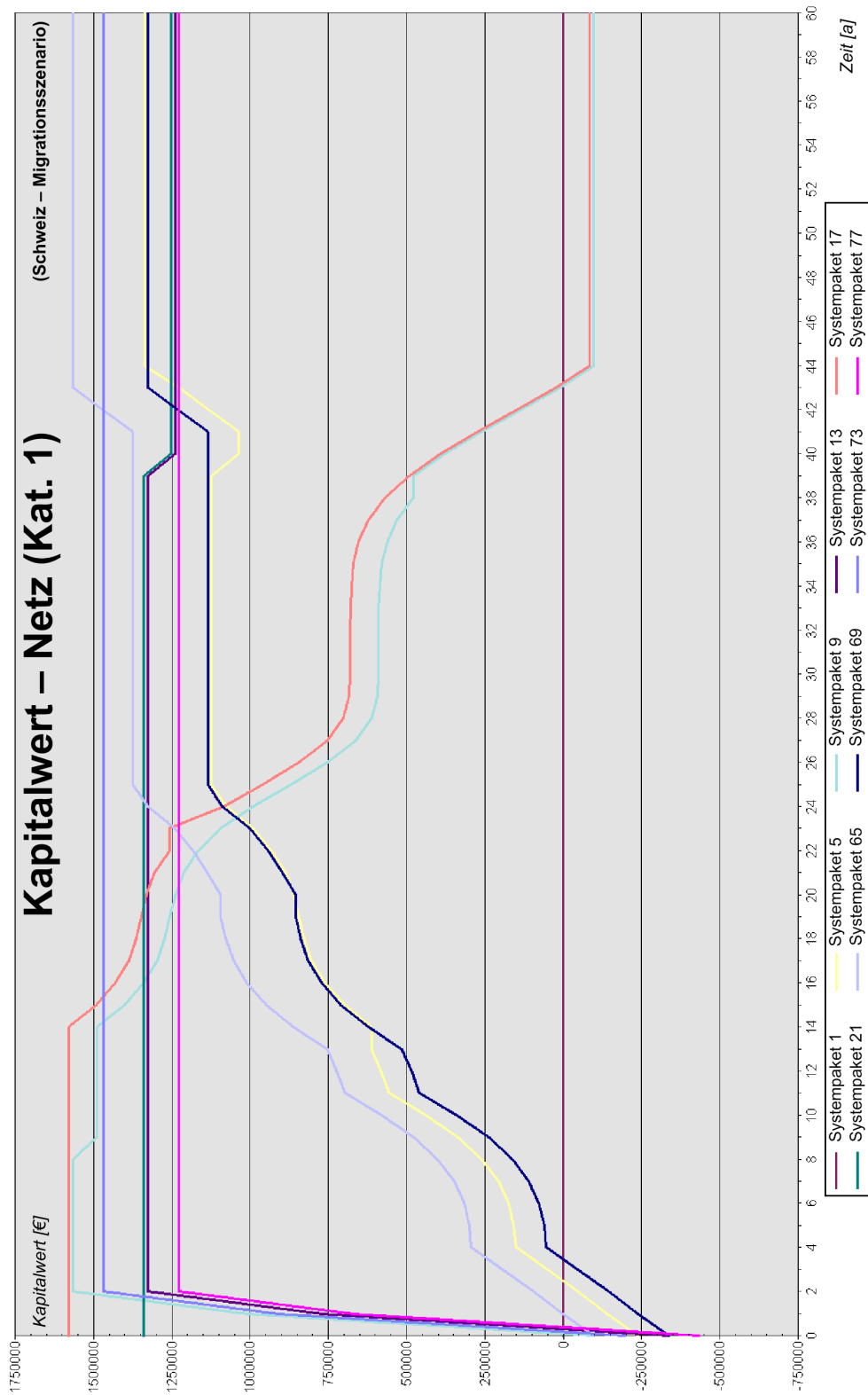


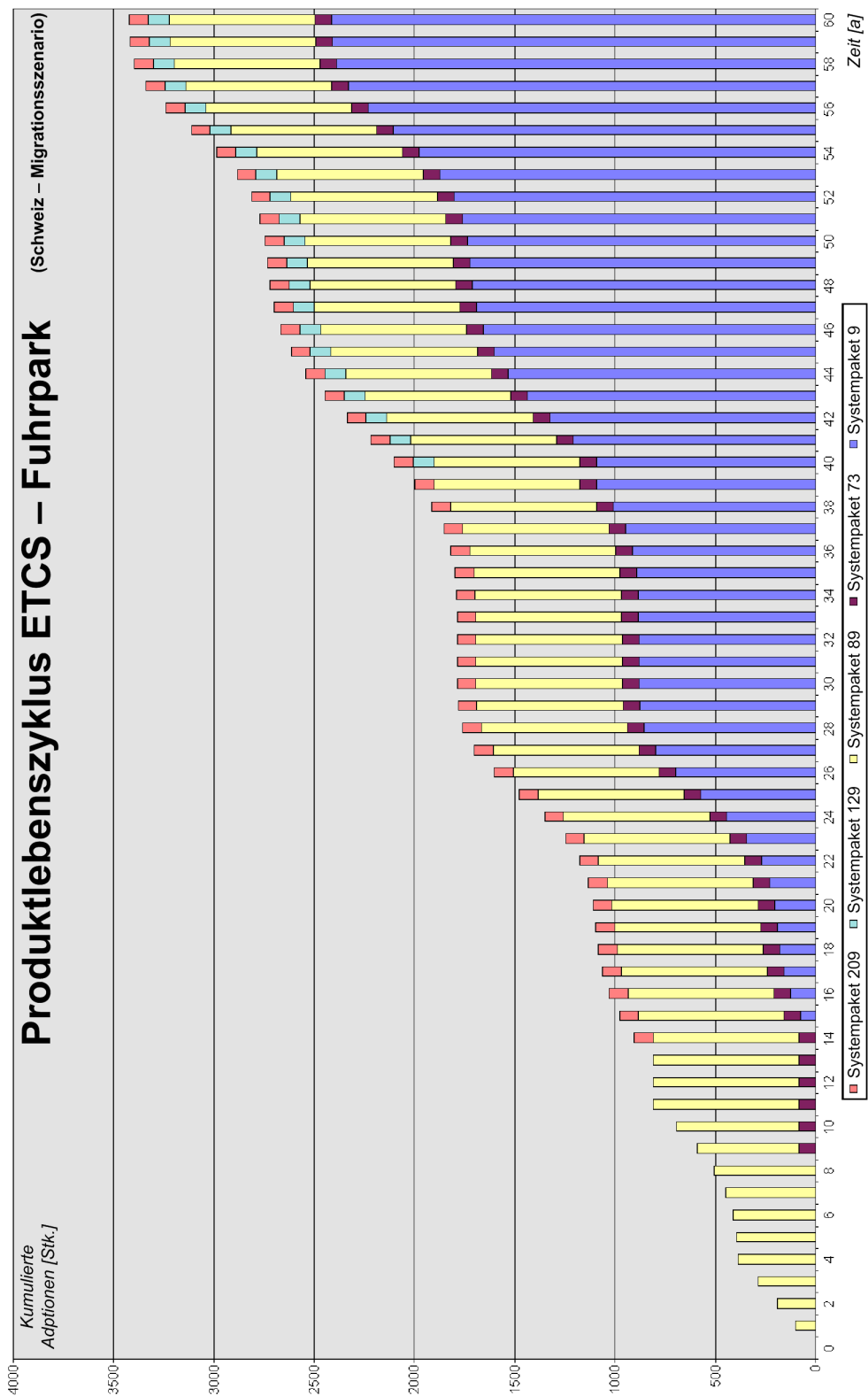




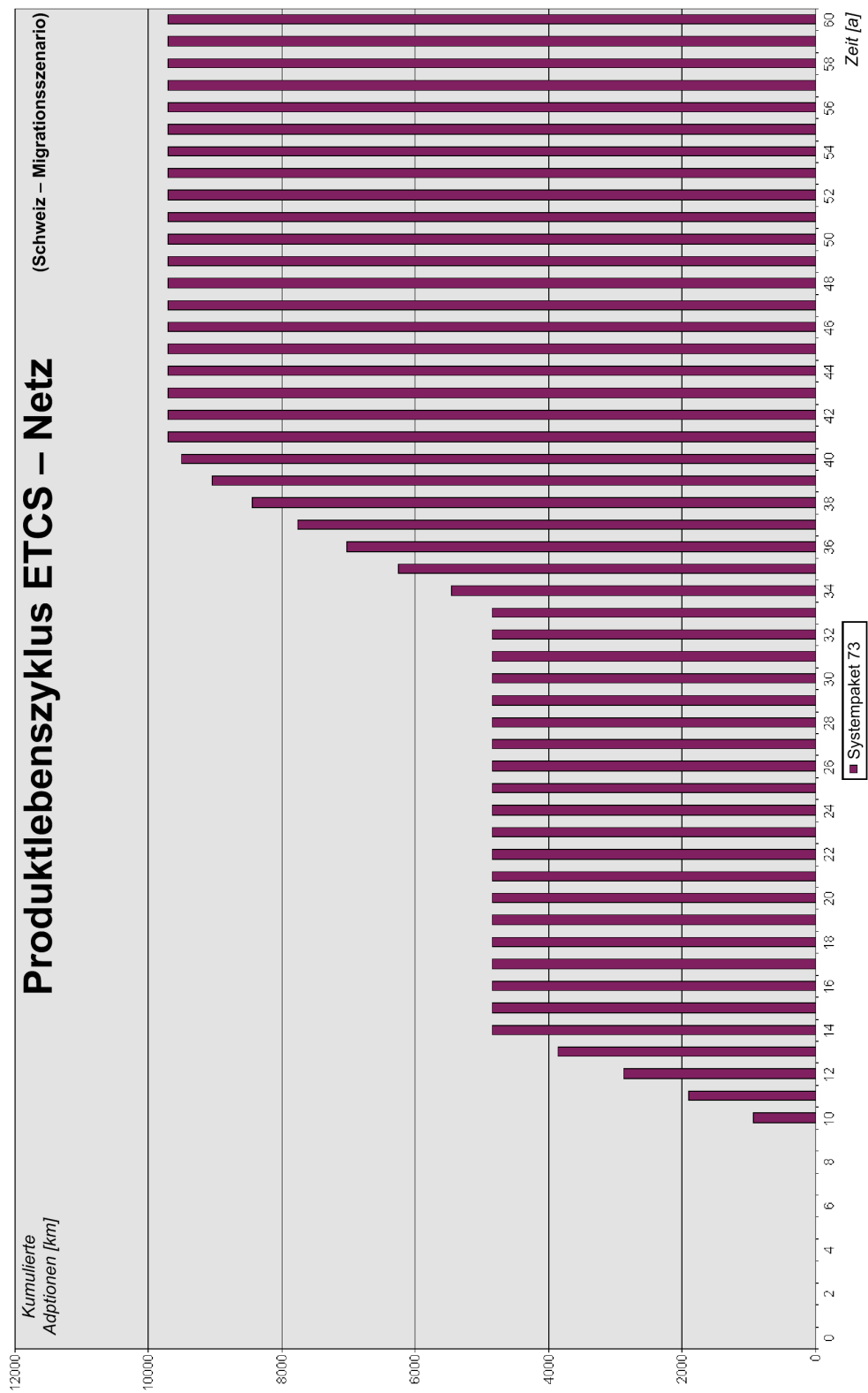




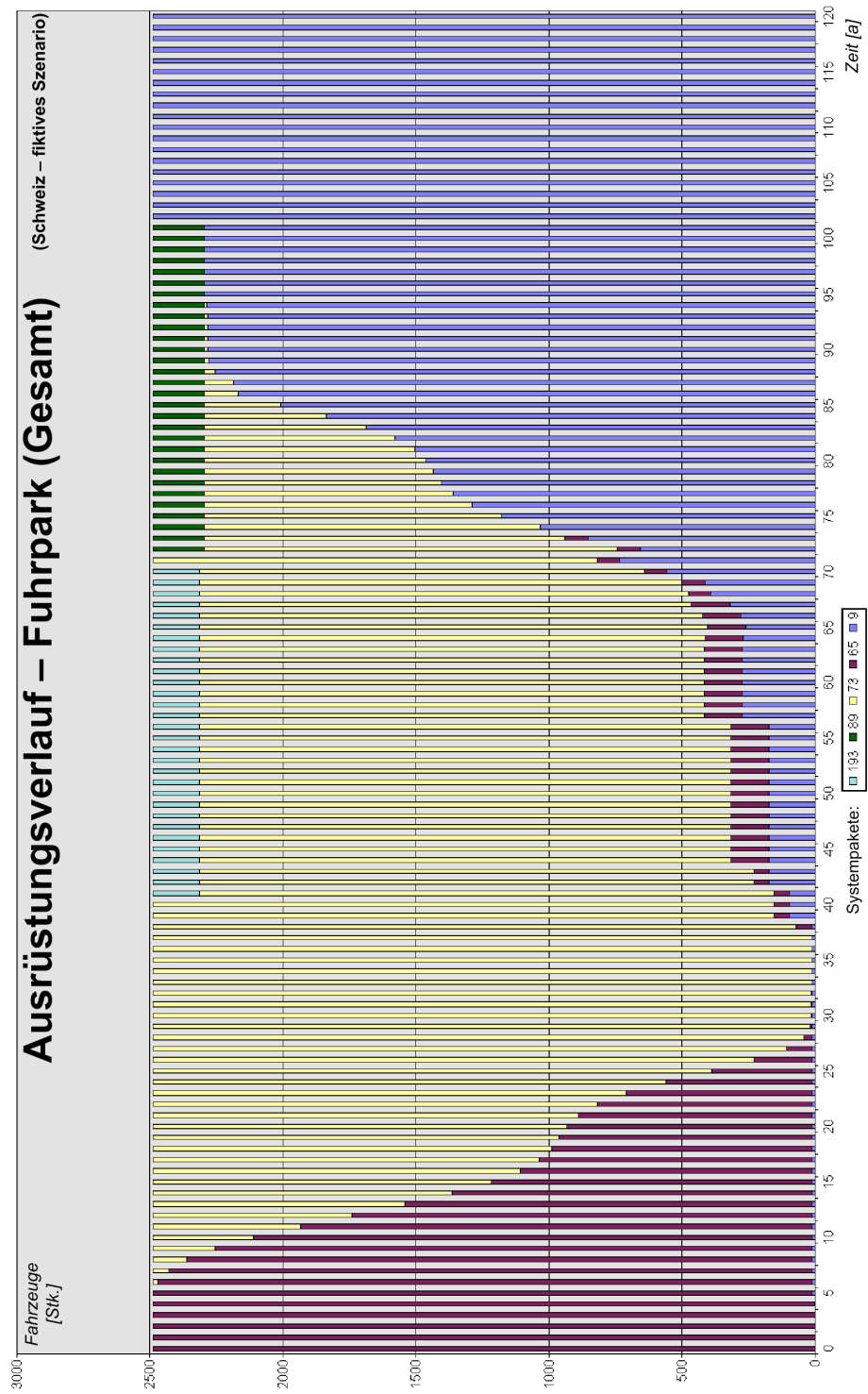


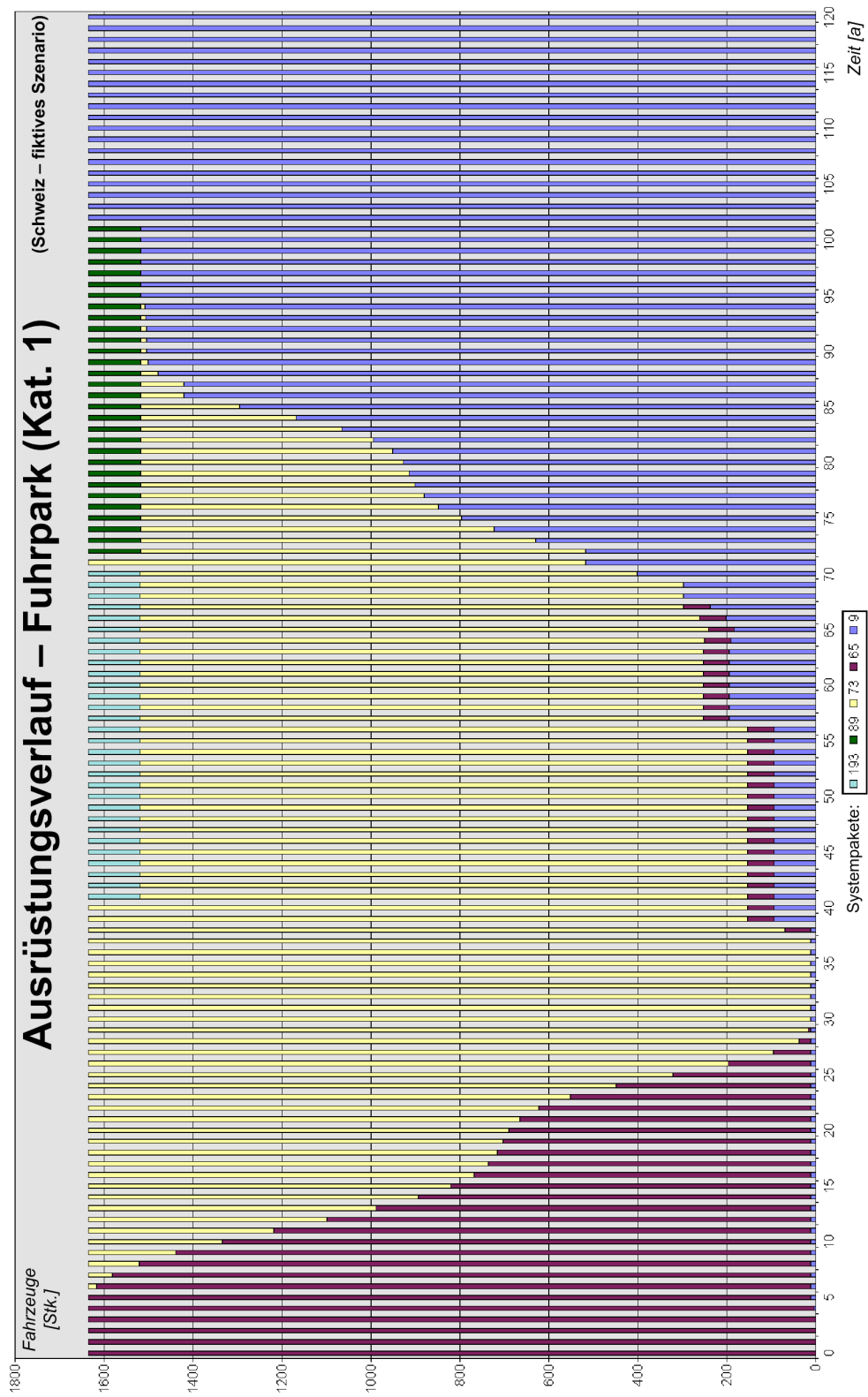


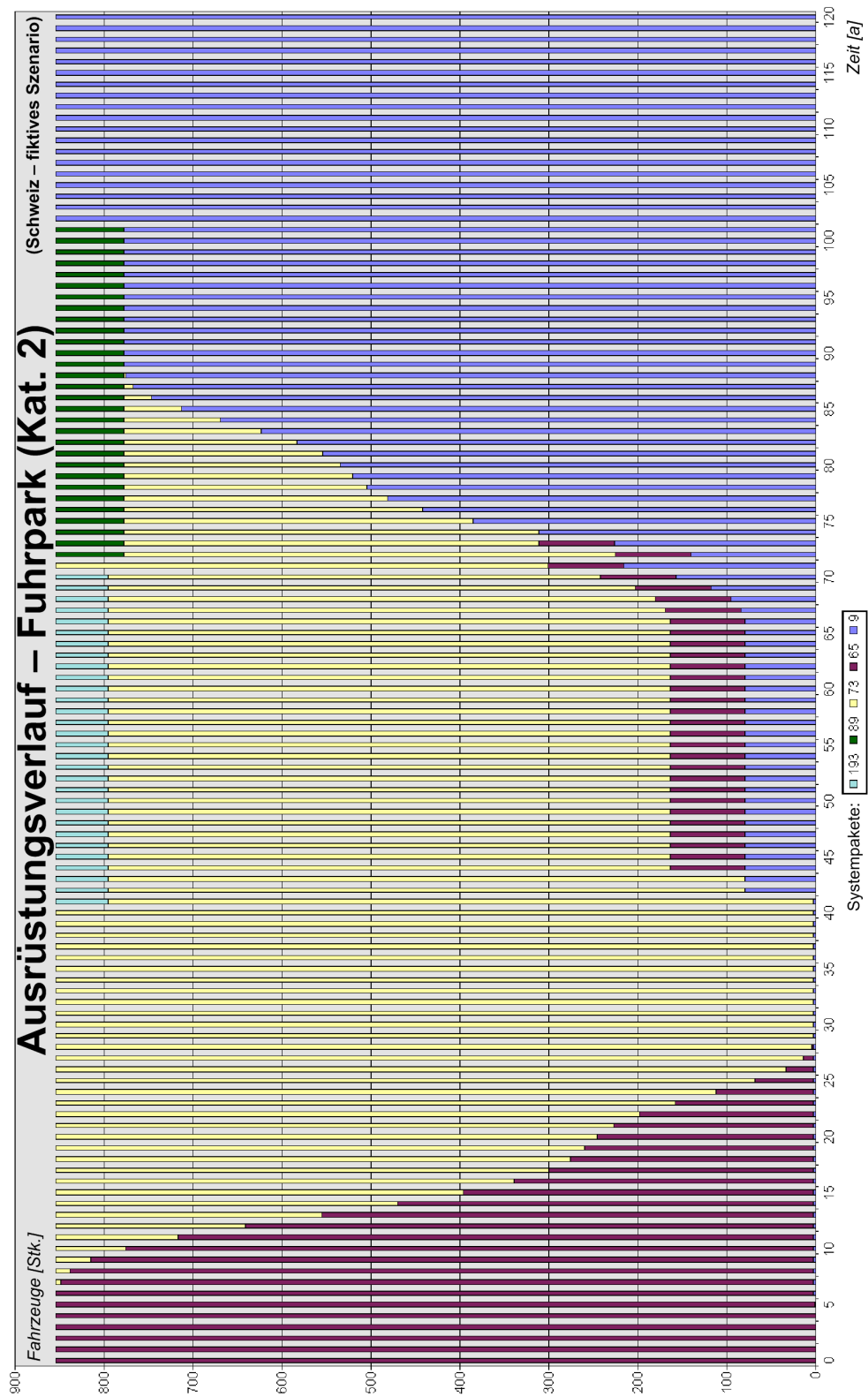


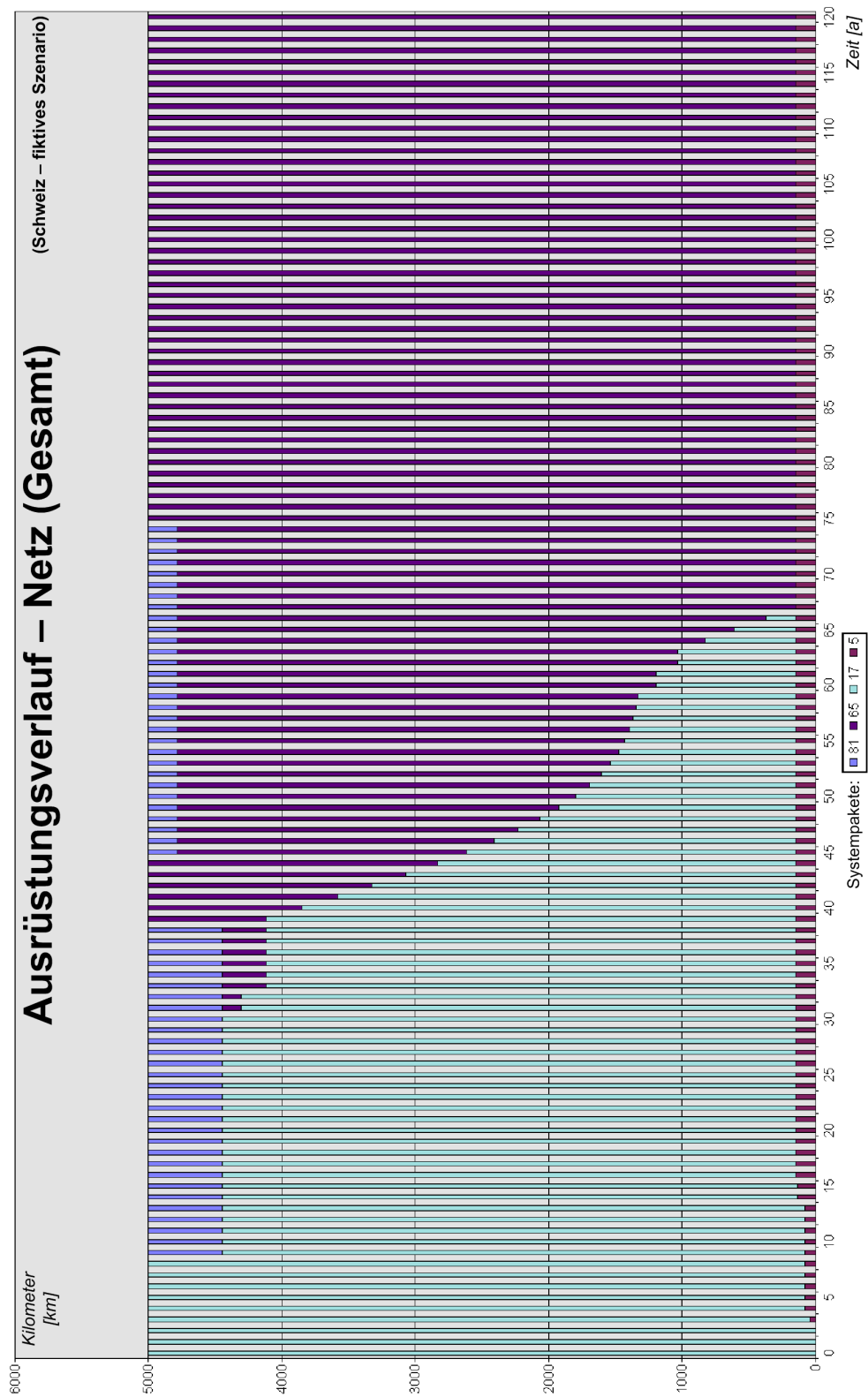


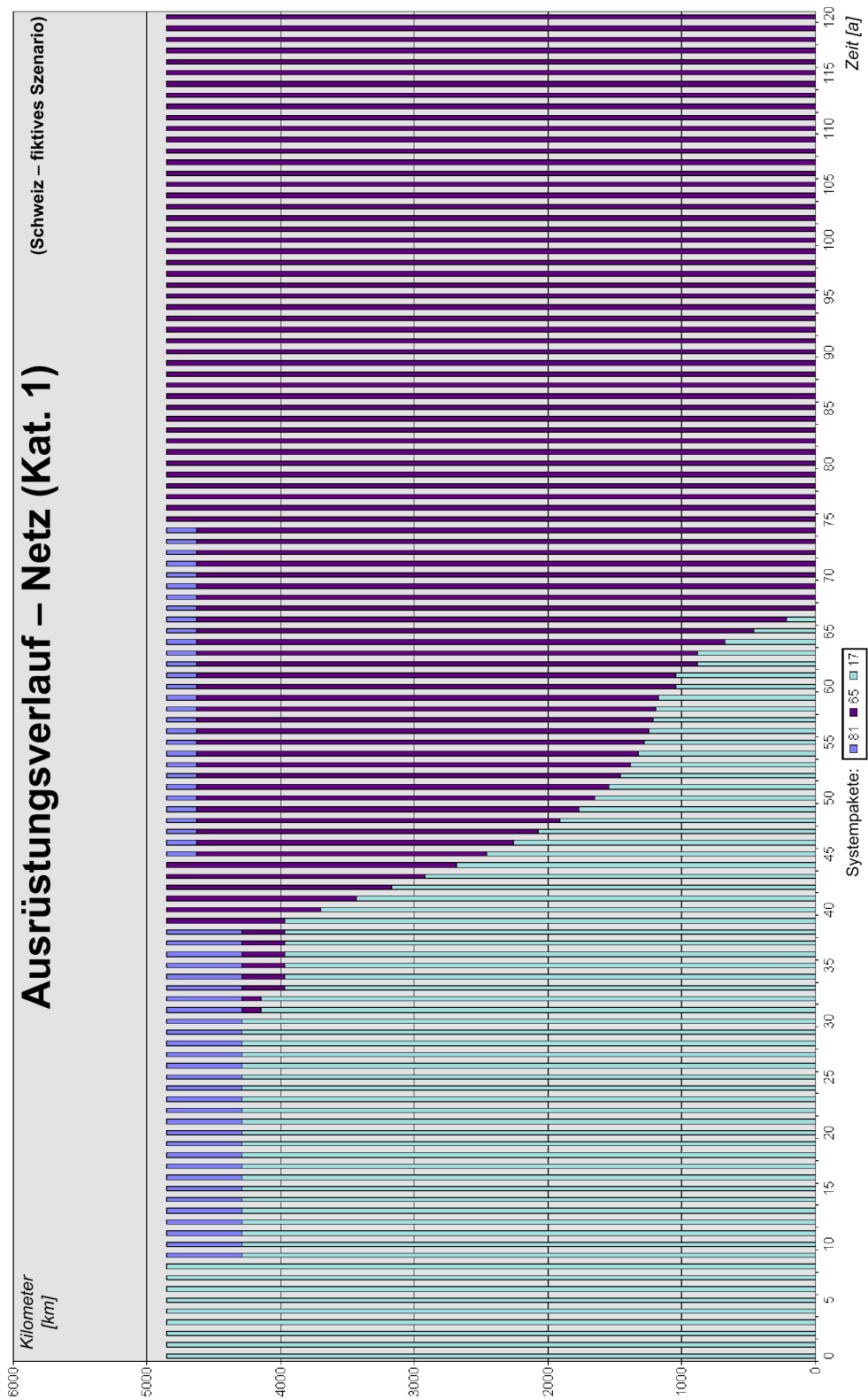
#### C.4. Abbildung des fiktiven Szenarios

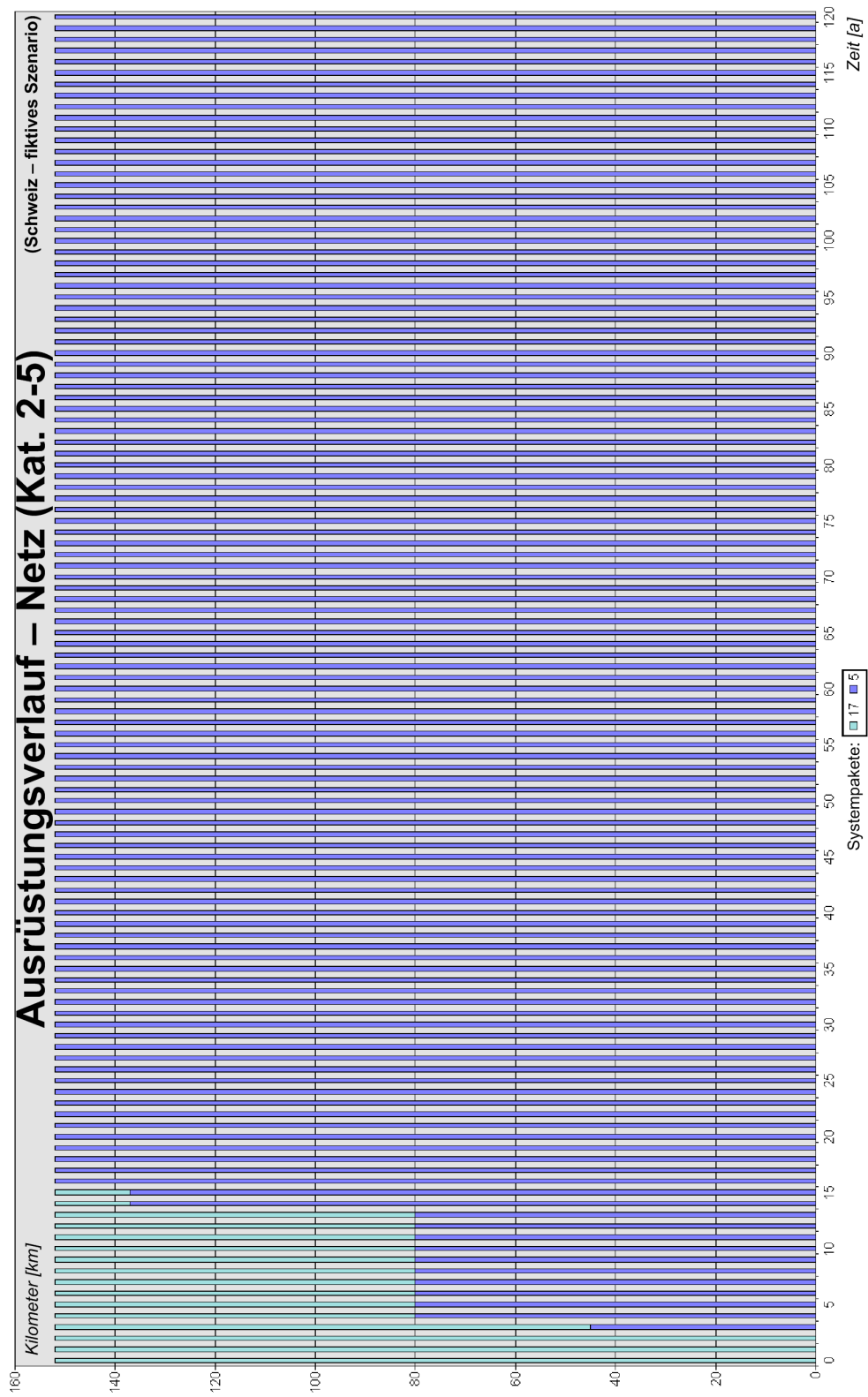


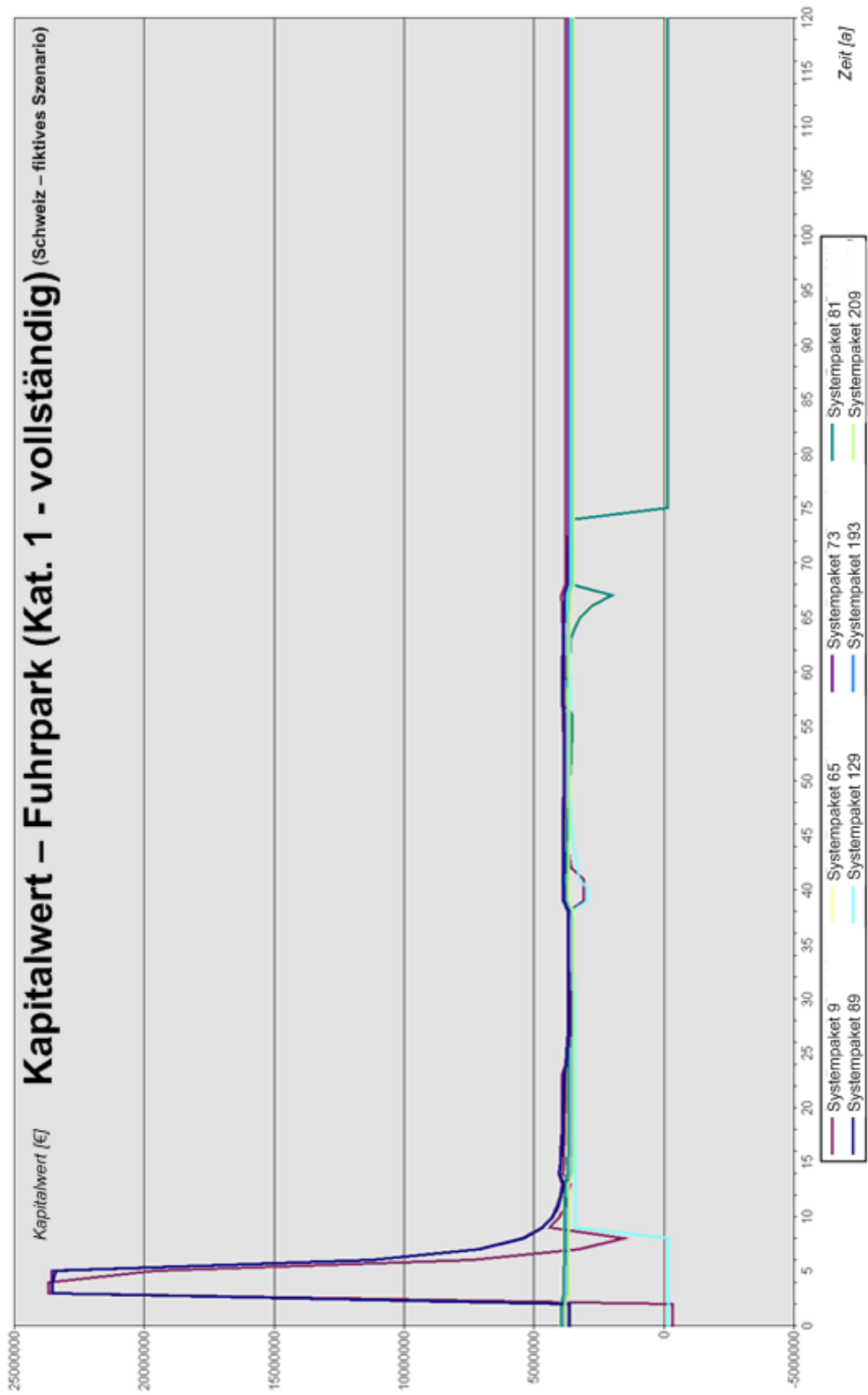




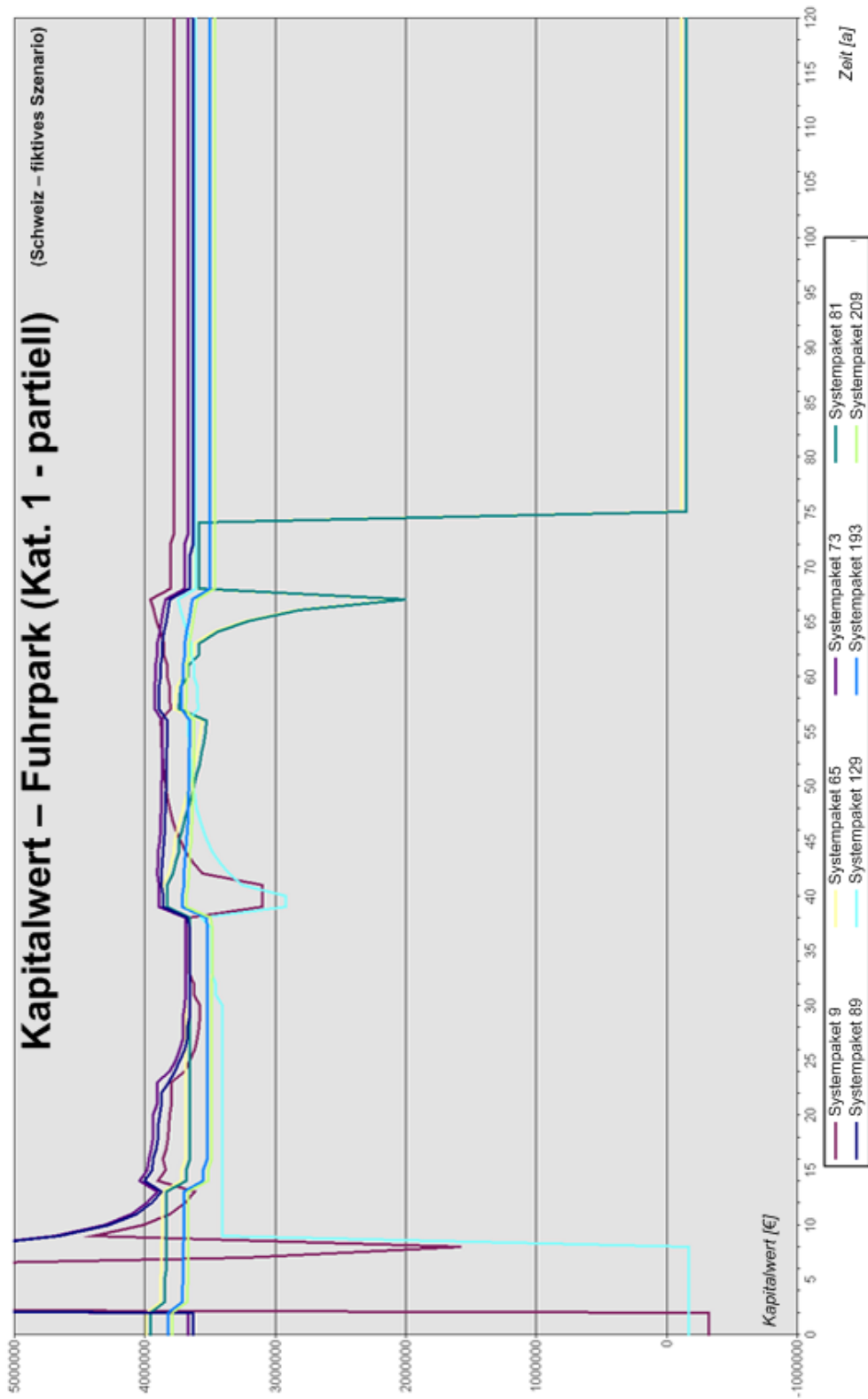


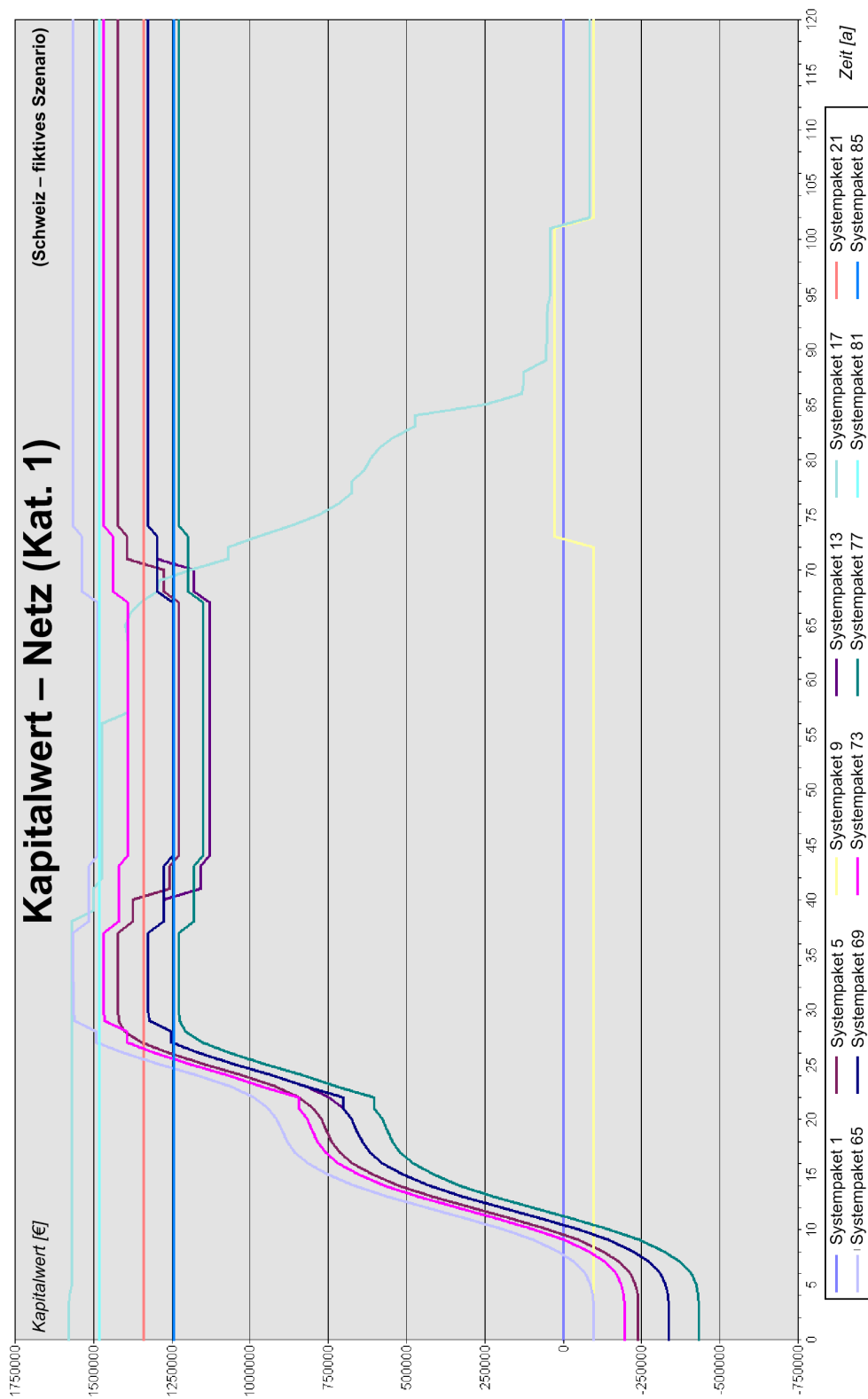


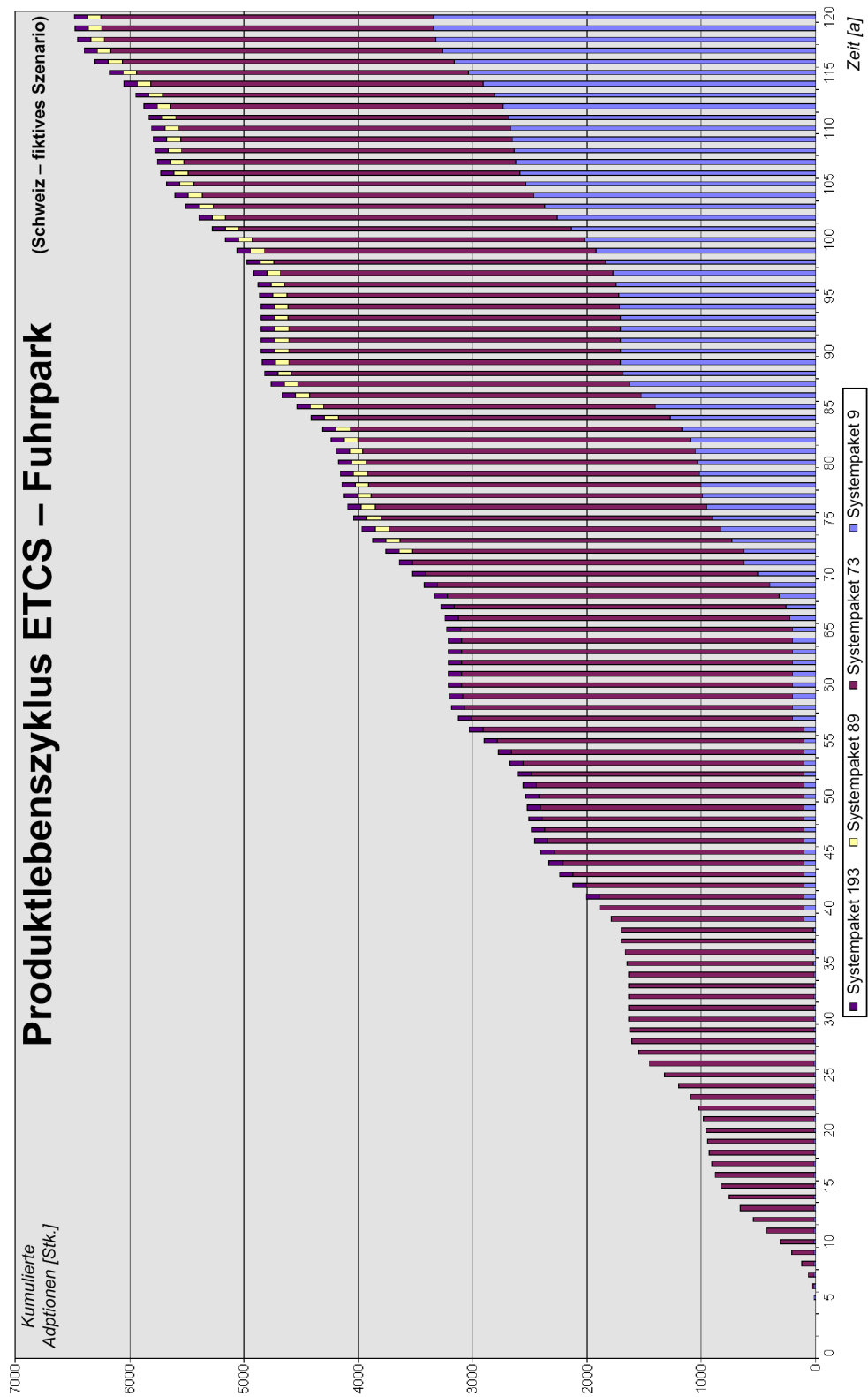


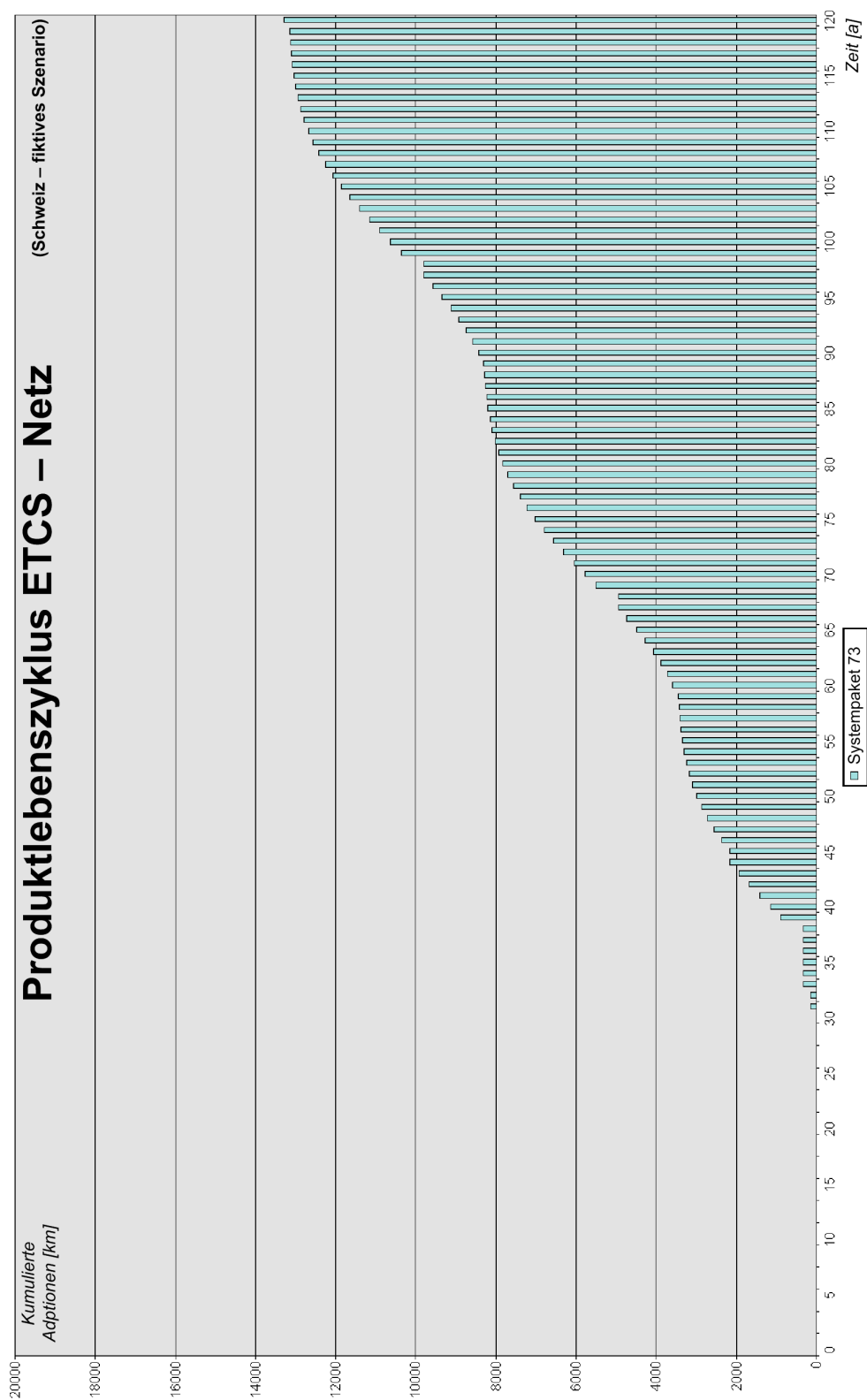












## D. Simulationsexperiment - Gesamteuropa

### D.1. Systemkompatibilität & Systempakete

Tabelle d.1.: Systemkompatibilität - Fallbeispiel Europa

		Systeme - Netzseite			
		ETCS L1	SysBL1	ETCS L2	SysBL2
Systeme - Fahrzeugseite	ETCS L1	<b>1</b>	0	0	0
	SysBL1	0	<b>1</b>	0	0
	ETCS L2	<b>1</b>	0	<b>2</b>	0
	SysBL2	0	<b>1</b>	0	<b>2</b>

Tabelle d.2.: Systempakete der Fahrzeugseite - Fallbeispiel Europa

Systempakete	Einzelnen Systeme			
	ETCS L1	SysBL1	ETCS L2	SysBL2
1				
5				✓
9			✓	
13			✓	✓
65		✓		
69		✓		✓
73		✓	✓	
77		✓	✓	✓
129	✓			
133	✓			✓
193	✓	✓		
197	✓	✓		✓

Tabelle d.3.: Systempakete der Netzseite - Fallbeispiel Europa

Systempakete	Einzelnen Systeme			
	ETCS L1	SysBL1	ETCS L2	SysBL2
1				
3				✓
5			✓	
7			✓	✓
17		✓		
19		✓		✓
21		✓	✓	
23		✓	✓	✓
33	✓			
35	✓			✓
49	✓	✓		
51	✓	✓		✓

## D.2. Eingangsdaten

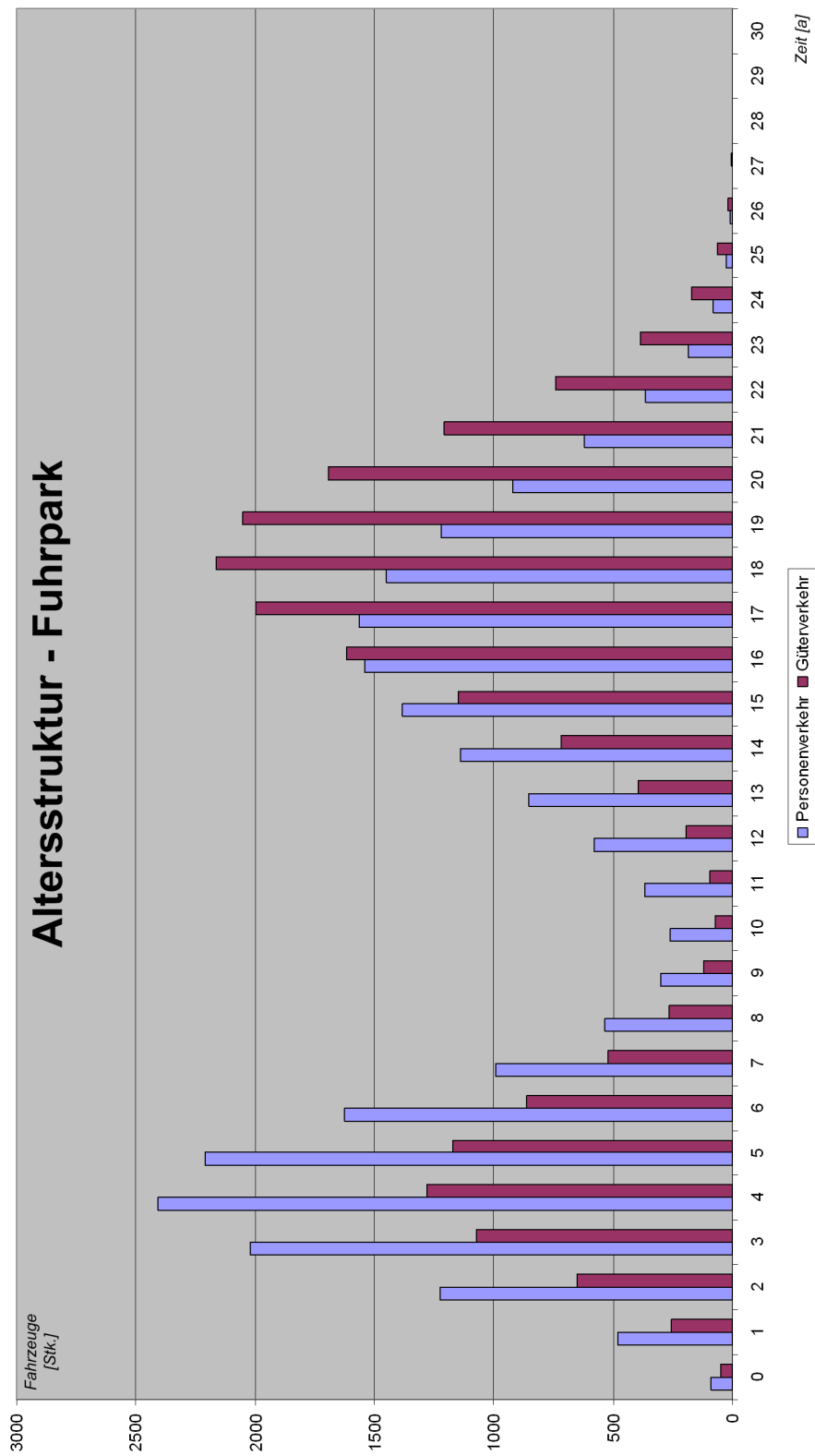
Tabelle d.4.: Eingangsdaten - Fallbeispiel Europa

<b>Allgemeine Daten</b>	
Startzeitpunkt ( $t = 0$ )	ca. 2003
Nutzungsdauer	30 Jahre
Kalkulationszinssatz	3,5 Prozent
Fuhrpark - gesamt	45.446 Fahrzeuge
Fuhrpark - Kategorie 1 (Personenverkehr)	24.448 Fahrzeuge
Fuhrpark - Kategorie 2 (Güterverkehr)	20.998 Fahrzeuge
Netz - gesamt	218.836 Kilometer
Netz - Kategorie 1 (konv. Normalspurnetz)	203.899 Kilometer
Netz - Kategorie 2 (Korridore)	11.100 Kilometer
Netz - Kategorie 3 (HGV Strecken)	3.837 Kilometer
Betriebsleistung Personenverkehr	3,03 Mrd Trkm pro Jahr
Betriebsleistung Güterverkehr	0,87 Mrd Trkm pro Jahr
Einzahlungskoeffizient - Netzseite	2,8 Euro pro Trasse, pro Kilometer
Einzahlungskoeffizient - Personenverkehr	2,61 Euro pro Trassenkilometer
Einzahlungskoeffizient - Güterverkehr	10,02 Euro pro Trassenkilometer
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - ETCS L1</b>	
Anschaffungsauszahlung	120.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	2.400 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	2.400 Euro pro Fahrzeug
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - SysBL1</b>	
Anschaffungsauszahlung	120.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	2.400 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	2.400 Euro pro Fahrzeug
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - ETCS L2</b>	
Anschaffungsauszahlung	250.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	5.000 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	5.000 Euro pro Fahrzeug
<b>Fahrzeugseitige Systemauszahlungen - SysBL2</b>	
Anschaffungsauszahlung	250.000 Euro pro Fahrzeug
Betriebsauszahlungen	5.000 Euro pro Fahrzeug, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	5.000 Euro pro Fahrzeug
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - ETCS L1</b>	
Anschaffungsauszahlung	75.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	1.500 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.500 Euro pro Kilometer
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - SysBL1</b>	
Anschaffungsauszahlung	75.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	1.500 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.500 Euro pro Kilometer
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - ETCS L2</b>	
Anschaffungsauszahlung	200.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	1.000 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.000 Euro pro Kilometer
<b>Netzseitige Systemauszahlungen - SysBL2</b>	
Anschaffungsauszahlung	200.000 Euro pro Kilometer
Betriebsauszahlungen	1.000 Euro pro Kilometer, pro Jahr
Entsorgungsauszahlungen	1.000 Euro pro Kilometer

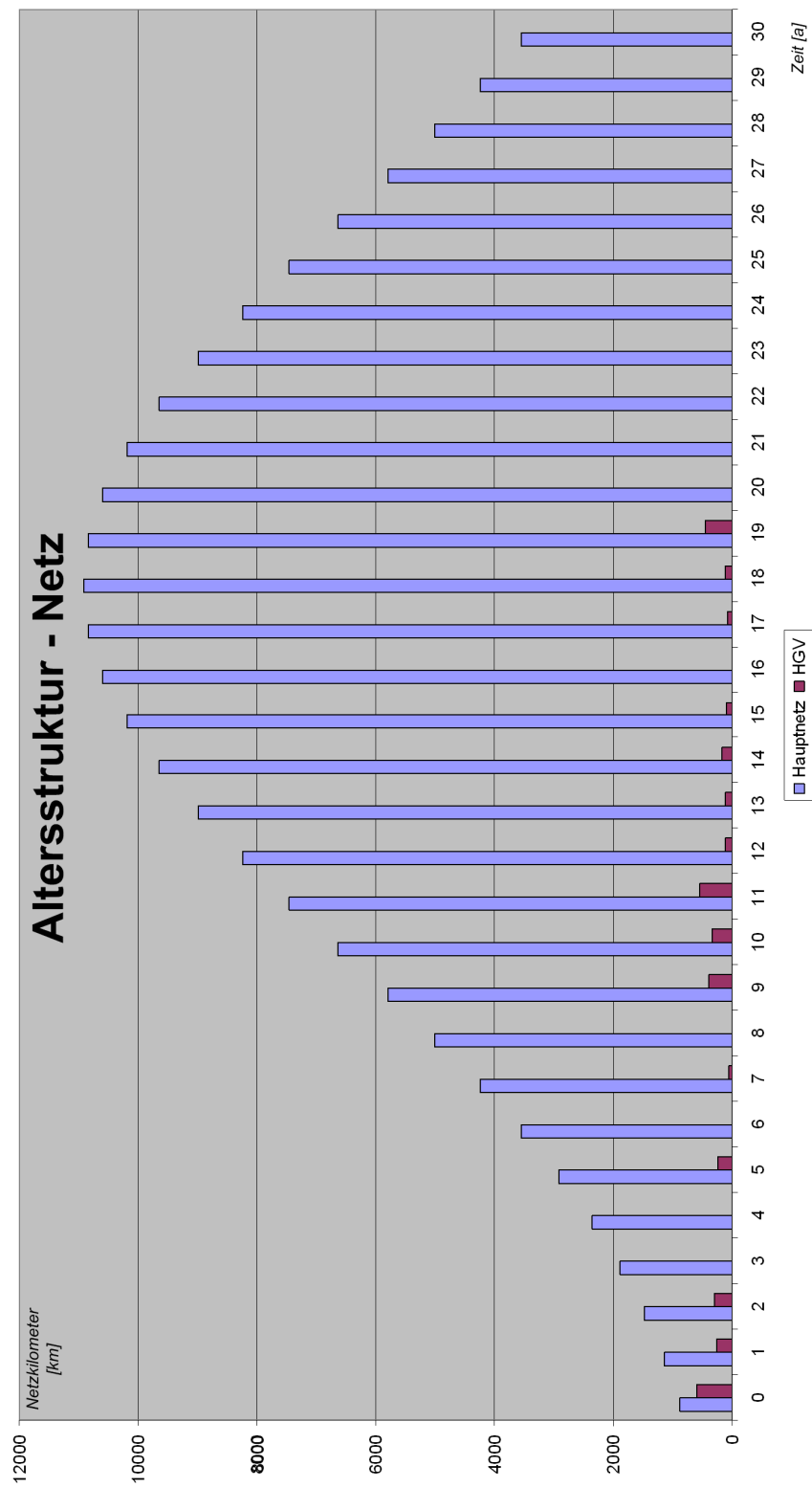
### D.3. Europäische ETCS-Projekte

Tabelle d.5.: ETCS Projekte - Fallbeispiel Europa

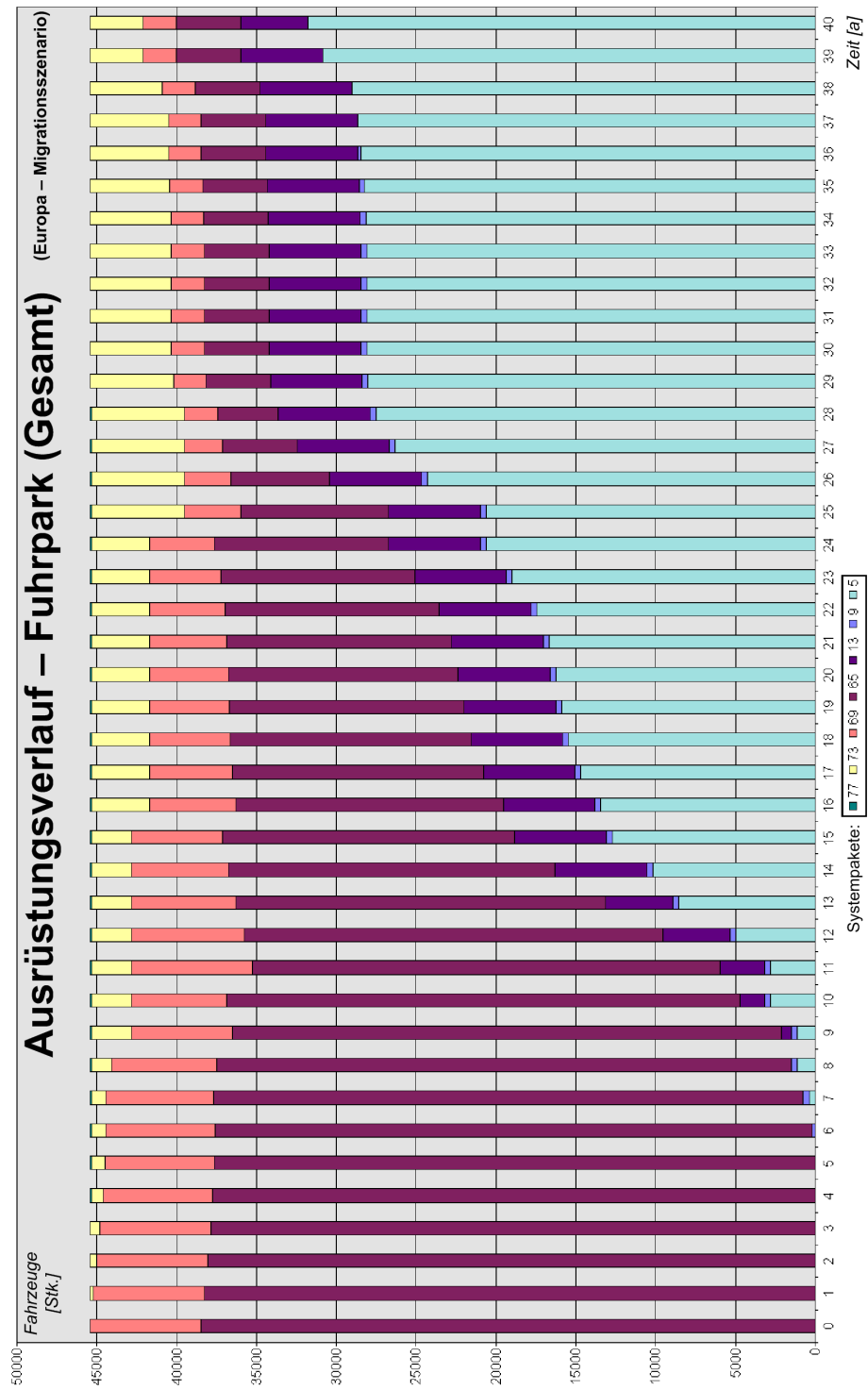
Realisierungsjahr	Name	Länge [km]	System
2001	Sofia-Burgas	250	ETCS L1
2002	Bucharest-Campina	92	ETCS L1
2004	Zaragoza Huesca	80	ETCS L1
2004	Madrid-Lleida	460	ETCS L2
2005	Rom-Neapel	220	ETCS L2
2005	Lleida-Barcelona	180	ETCS L2
2005	Segovia-Valladolid	100	ETCS L2
2005	Toledo Access	21	ETCS L2
2005	Wien-Nickelsdorf	67	ETCS L1
2005	Budapest-Szolnok	170	ETCS L1
2005	Budapest-Kimle	170	ETCS L1
2006	Jüterborg-Halle/Leipzig	160	ETCS L2
2006	Mattstetten-Rothrist	46	ETCS L2
2006	Turin-Mailand	150	ETCS L2
2006	Amsterdam-Utrecht	30	ETCS L2
2006	HSL Zuid	100	ETCS L2
2006	HSL3, HSL4	65	ETCS L2
2008	Luxemburg Netz	270	ETCS L1
2007	Paris-Baudrecourt	460	ETCS L2
2007	Lötschberg Basis Tunnel	35	ETCS L2
2007	Bologna-Florenz	90	ETCS L2
2007	Betuwe Line	160	ETCS L2
2008	Mailand-Bologna	200	ETCS L2

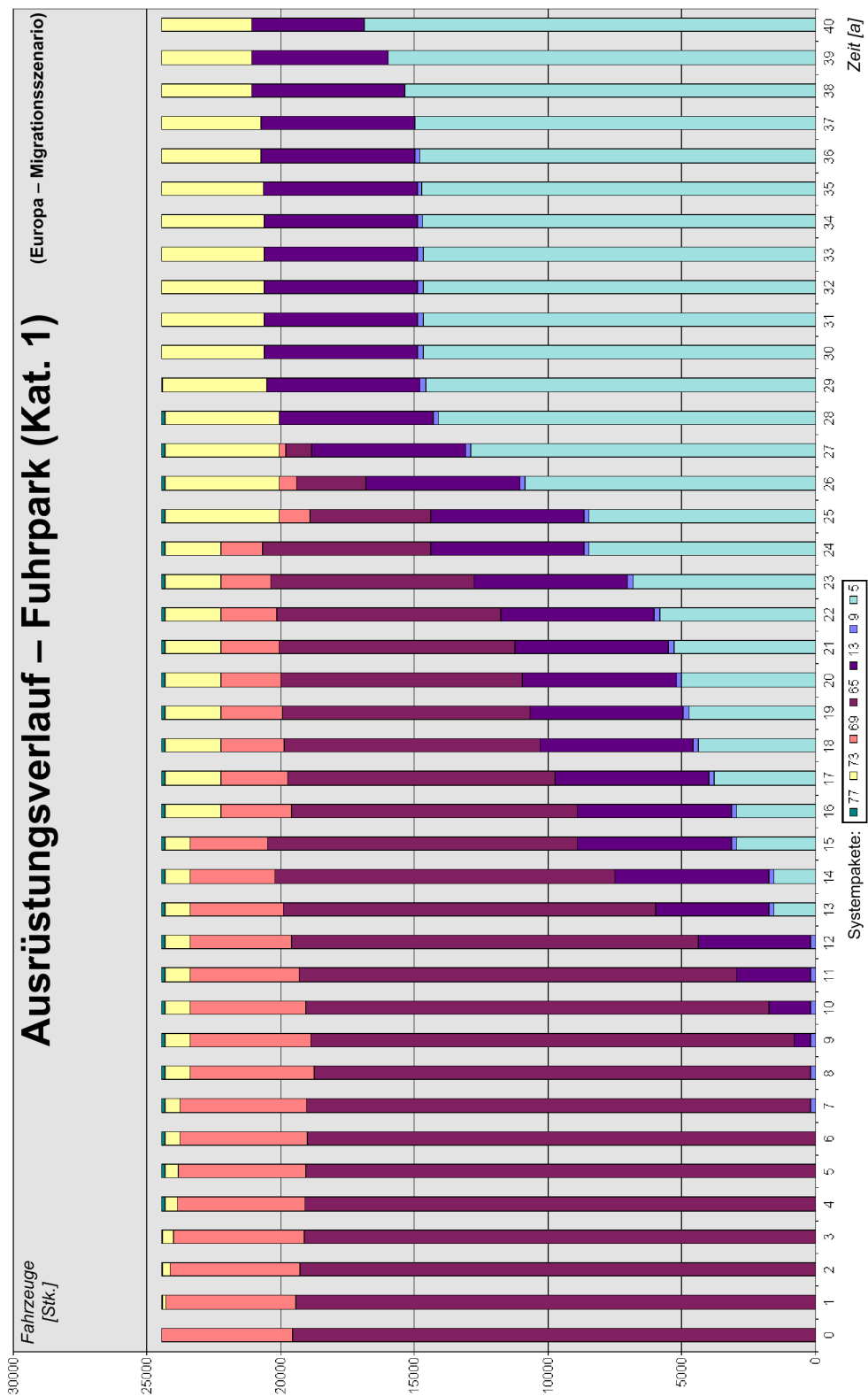


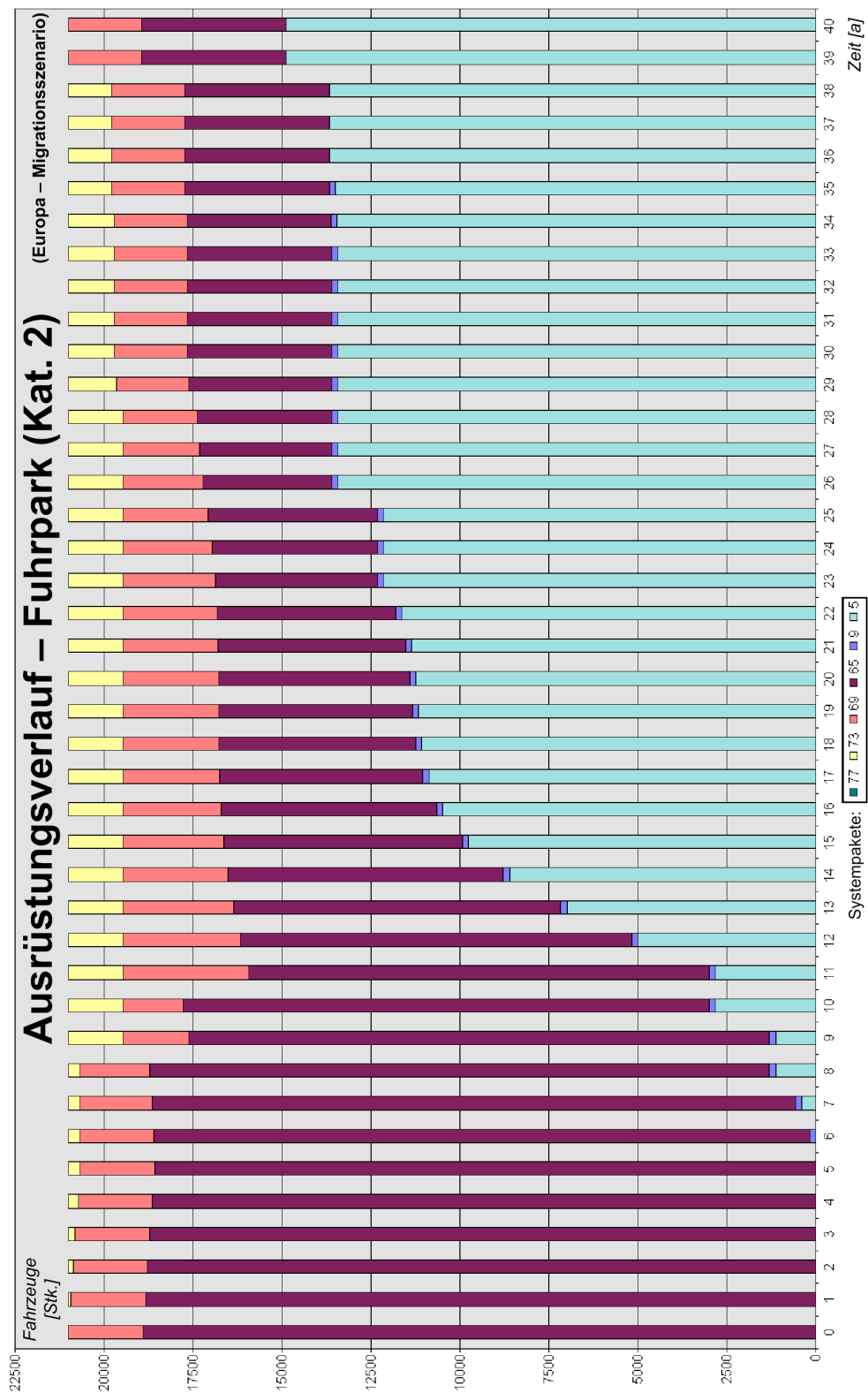


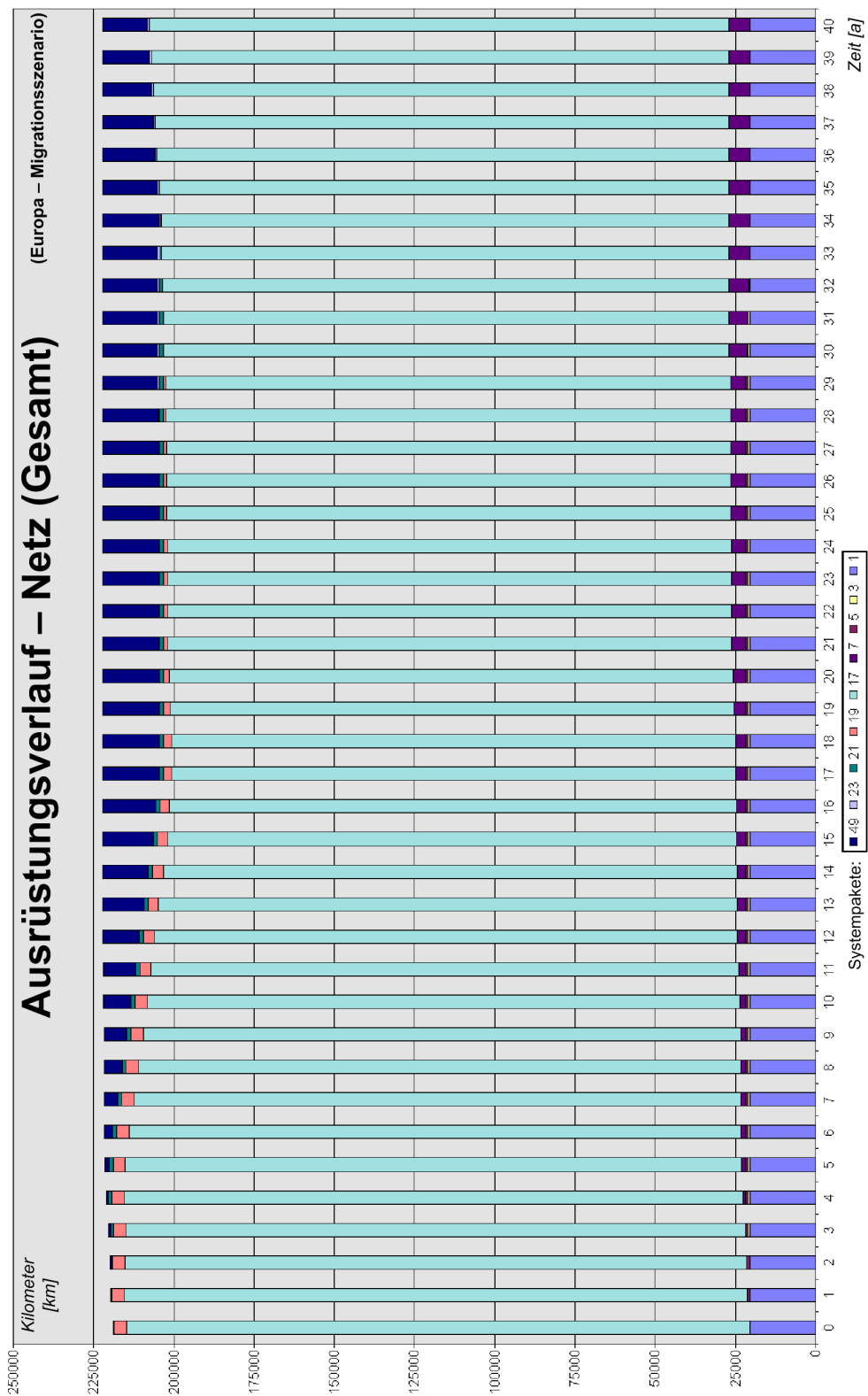


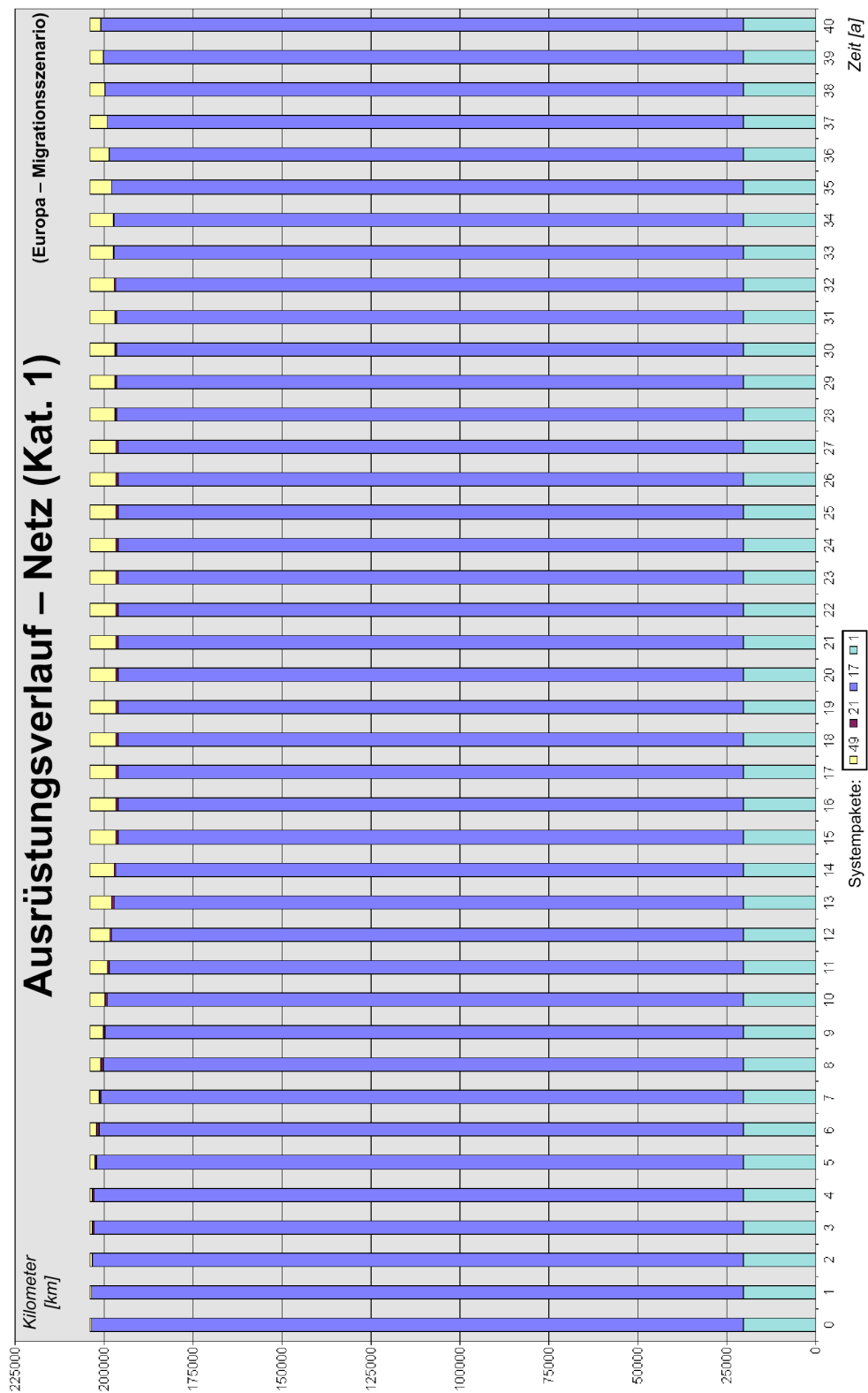
## D.4. Abbildung des realen Migrationsszenarios

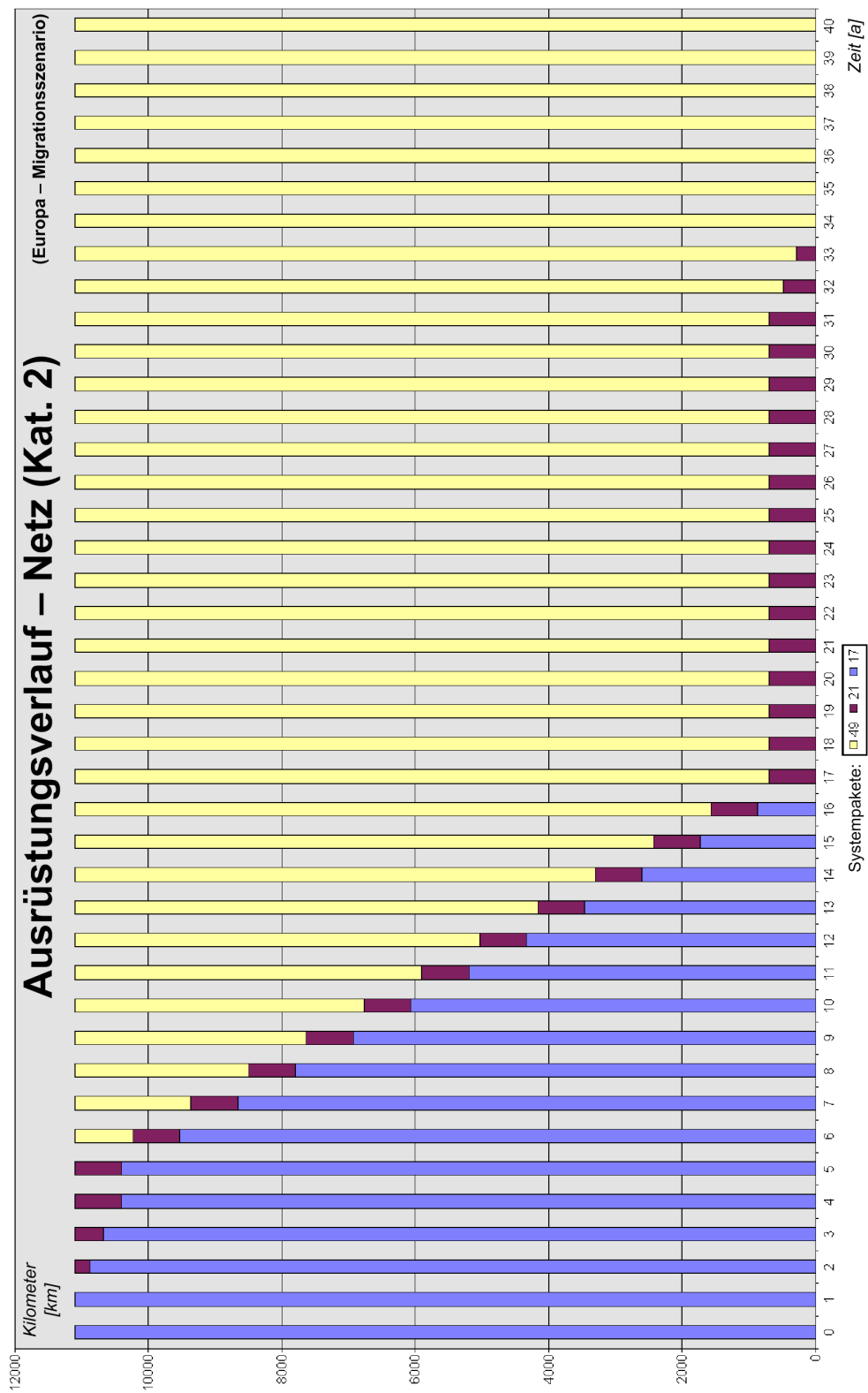


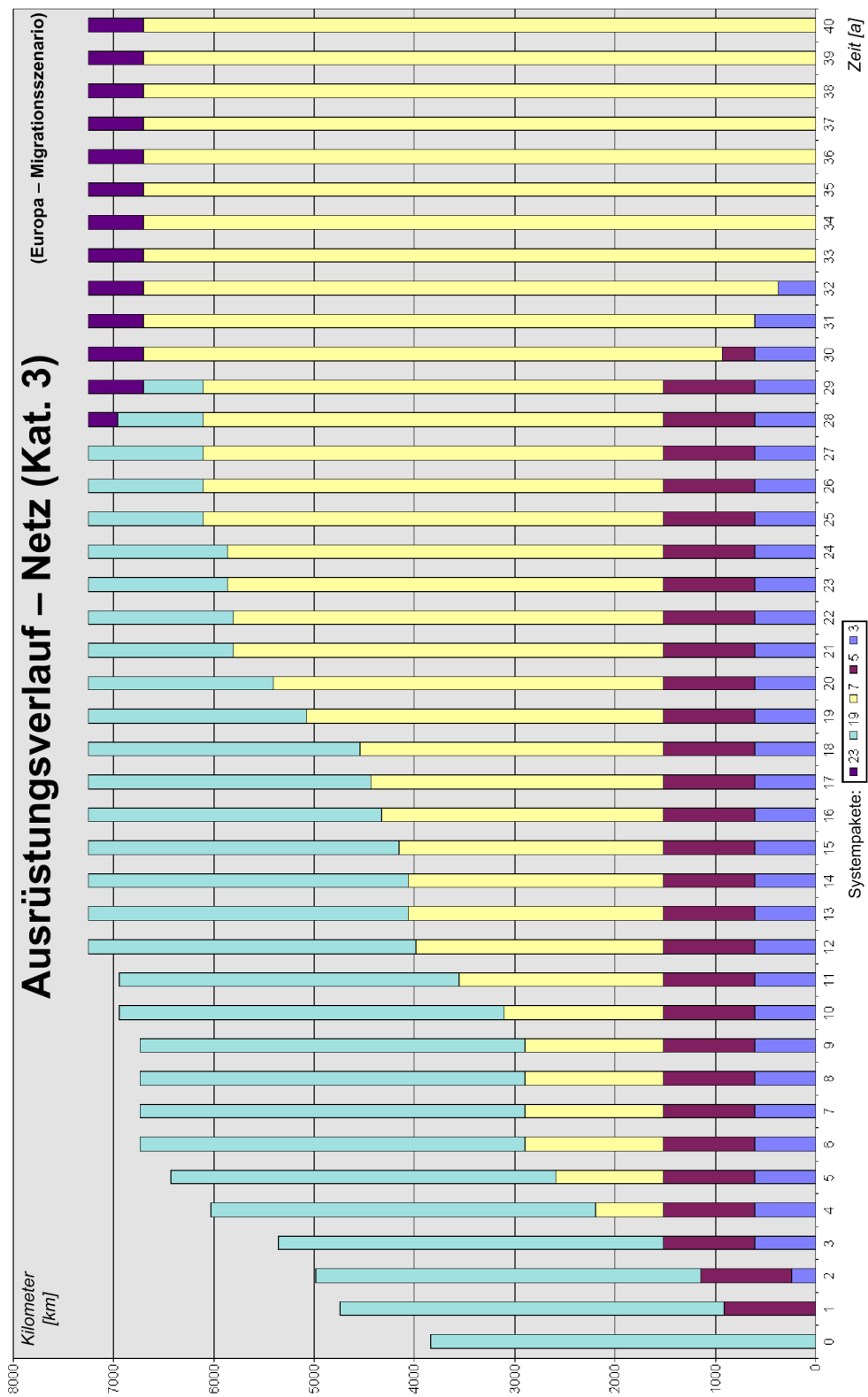














## D.5. Abbildung des fiktiven Szenarios

